日本原子力学会和文論文誌（2012），Advance Publication by J-stage, doi:10.3327/taesj.J12.012

論　文　福島第一原子力発電所事故関連論文

福島第一原子力発電所事故後の
世界の天然ウラン・ウラン濃縮役務貿易フローの長期見通し

松尾 雄司[1,*]，村上 朋子[2]

Long-Term Outlook for Global Natural Uranium and Uranium Enrichment Supply and Demand Situations after the Impact of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

Yuhji MATSUO[1,*] and Tomoko MURAKAMI[2]

[1,2]*The Institute of Energy Economics, 1-13-1 Kachidoki, Chuo-ku, Tokyo 104-0054, Japan*

(Received June 1, 2012; accepted in revised form August 31, 2012; published online October 31, 2012)

In this paper, the authors propose long-term projections of global nuclear power generation, uranium production, and uranium enrichment capacities by region, and estimate the trade flows of natural uranium and uranium enrichment activities in 2020 and 2035. In spite of the rapid nuclear power generation capacity growth expected especially in Asia, the natural uranium and uranium enrichment trade will not be tightened by 2020 due to the projected increase in both natural uranium production and uranium enrichment capacities, which may cause a drop in natural uranium and uranium enrichment prices. Thus, there is a great possibility that the current projects for capacity expansion will be delayed considerably. However, in the ‘‘high-demand scenario’’, where nuclear expansion will be accelerated due to growing concerns about global warming and energy security issues, additional investments in uranium production and enrichment facilities will be needed by 2035. In Asia, the self-sufficiency ratio for both natural uranium supply and uranium enrichment activities will remain relatively low until 2035. However, the Herfindahl-Hirschman (HH) index of natural uranium and uranium enrichment activity trade to Asia will be lowered considerably up to 2035, indicating that nuclear capacity expansion can contribute to enhancing energy security in Asia.

KEYWORDS: nuclear fuels, enrichment, natural uranium resources, uranium production, reprocessing, tail assay, outlook, trade balance, numerical analysis, self-sufficiency, energy security

I. はじめに

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故は放射性物質の大量放出と長期に渡る住民の退避という深刻な事態を招き，国内外の原子力政策に大きな影響を与えることとなった。日本では従来「エネルギー基本計画」[1)]に従い今後2020年までに9基，2030年までに14基の発電用原子炉を新設することが目指されていたが，今般の事故を受けて同計画は見直し作業が進んでおり，日本の原子力政策は今後大幅な修正を求められることは間違いがない。ただし福島の事故の有無に関わらず日本が従来通り国際的に温室効果ガス排出量の削減を求められる状況に変りはなく，その中で原子力がどのような位置付けをもって再度認識されることとなるかは，いまだ明確ではない。

翻って世界に目を転じると，ドイツは福島事故の直後に国内の旧型原子炉7基の運転を停止し，その後これらの原子炉はそのまま廃止とした上で，さらに残りの原子炉については2021年までに順次段階的に廃炉する方針を閣議決定した。またかつて原子力発電所をすべて停止したものの，最近になって新規発電所の建設の検討を進めていたイタリアでも，福島事故後に原子力発電再開の是非を問う国民投票が実施され，9割以上の反対により当面の原子力再開は不可能となった。このように，特に欧州の一部の国において福島の事故は原子力政策に直接の影響を与えることとなったが，一方でアジアの諸国，特に今後電力需要の急速な拡大が見込まれる中国やインドでは，原子力発電設備容量の急速な増加が見込まれる状況に変化はない。また同様に，米国・フランス・ロシア・韓国等の原子力先進国に

---

[1] （一財）日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット

[2] （一財）日本エネルギー経済研究所 戦略研究ユニット原子力グループ

* Corresponding author, e-mail: matsuo@edmc.ieej.or.jp

© 2012 Atomic Energy Society of Japan, All Rights Reserved.

おいても，自国の産業育成およびエネルギー安定供給，温室効果ガス削減等の観点から原子力推進政策自体に変化はみられない。このため少なくとも現状においては，今後も長期に亘り，化石燃料資源消費と温室効果ガス排出を削減するための有力な手段として，世界全体では原子力発電の利用は拡大を続けるものと見通される。

原子力発電の長期展望を考える際，問題となるのはウランの資源量である。既存技術である軽水炉の利用を続ける限り，ウラン燃料の需要量は今後長期に渡り急速な拡大を続ける。この需要拡大を緩和する要因としては，福島事故を受けた政策変化等の政策的要因，高速増殖炉の導入等の技術的要因およびトリウムサイクルの導入等の燃料転換要因などがあるが，これらの要因を考慮したとしても需要拡大が見込まれる状況に変りはなく，それに対して十分なウランの供給を行うことが可能であるのか，もし可能であるならばどのような地域から，どの程度のウランが供給されるのかを評価することは，将来の原子力発電の進展見通し，ひいては世界のエネルギー需給見通しや温室効果ガス削減見通しを考察する上で非常に重要である。また，濃縮ウランを燃料とする既存の軽水炉の利用に当たっては天然ウラン需要量とウラン濃縮役務量とはトレードオフの関係にあるため，ウランの需給を考える際には同時にウラン濃縮役務容量も考慮に入れる必要があり，両者の見通しは相互に不可分の関係にある。

原子力発電はエネルギー供給の重要な一部であることから，その将来見通しを評価する試みはIEA（国際エネルギー機関）[2,3]，IAEA（国際原子力機関）[4]，OECD[5]，米エネルギー省[6]，WNA（世界原子力協会）[7]など様々な機関で行われている。通常エネルギー需要量や発電量の将来推計を行う場合には計量経済モデルやコスト最適化モデル等を用いるのが普通であるが，原子力発電に関しては政策動向に依存するところが非常に大きいことから，これらの見通しでは，原子力についてはモデル計算の手法を取らず，各国ごとにエネルギー需給動向や政策動向を調査し，それを踏まえて将来の原子力発電設備容量を設定している。これは原子力の見通しに特有の状況であると思われる。

他方で，ウラン生産の見通しの評価例としては，OECD[8]，WNA[9]などがある。これらは個々のウラン鉱山とその開発プロジェクトについて調査を行い，それを集計して各国および地域・世界のウラン生産能力およびその拡大の見通しを立てたものであり，計算手法よりも，その資料としての価値が大きいものであろう。

しかし，これらの需要側および供給側双方の見通しを踏まえて，将来のウラン需給見通しを詳細に分析した研究例は多くはない。例えば小宮山ら[10]は世界の原子力発電設備の見通しを独自に作成し，OECDのウラン供給見通しを参照することにより2030年および2100年までのウラン需給シナリオを評価し，政策的インプリケーション等を導き出したが，このような研究例は世界全体でのウラン需要量と生産量とのシナリオを別々に作成し，それを比較して余剰生産量や供給不足量を評価したに過ぎず，ウラン濃縮のような原子燃料の需給に固有の要素が十分に考慮されていない。村上[11]はそれを一歩進め，ウラン濃縮におけるテイル濃度を変化させることにより天然ウラン需要量とウラン濃縮役務需要量とがトレードオフの関係となることを考慮し，2030年時点での天然ウラン需給逼迫の可能性がテイル濃度の変動によって大きく変化することを明らかにした。しかしこの例でも，天然ウラン生産量・ウラン濃縮役務量と濃縮ウラン需要量の三者の関係が世界全体で評価されたに過ぎず，例えば今後原子力発電増大の核となるアジア地域にとってウラン需給はどのようなものとなるか，といった問いに答えることはできない。一般に，これらの貿易の取引実態やコストについては非公開のデータが多く，そのため地域別の貿易フローを将来まで推計した分析例はほとんどみられない。

このような状況把握のもと，本研究ではまず筆者らの作成した世界のエネルギー需給見通し[12]を参照して世界の各地域ごとに原子力発電の見通しを作成し，既往文献や各事業者のHP等から得られる情報をもとに将来の天然ウラン生産量およびウラン濃縮設備容量を評価した。その上で，現状（2009年）の実績値をもとに，最小二乗法を用いた評価手法により将来の貿易フローの推計を試みた。

本研究の意義は，大きくは以下の2点にある。第一に，2035年までの世界の天然ウラン・ウラン濃縮役務の需要量・供給量を予測し，それらの価格との関係を考慮した上で，長期の供給可能性について考察を加えた点である。一般に，原子力発電については，発電コストに占める燃料費の比率が小さく，発電所建設計画の進展は第一に各国政府の政策動向に，第二に発電プラントそのものの建設費や資金調達環境によって影響される。一方で，一度建設された原子力発電所は，経済性の観点から，ベース電源として最大限の利用がなされる。そのため，燃料価格が原子力発電量，ひいてはウラン燃料需要量に与える影響は小さい。一方で，天然ウラン価格とウラン濃縮価格の相対比はコスト最適となるテイル濃度に影響を与え，それを通じてそれぞれの需要量を変化させる。本研究ではこの関係を踏まえ，2020年および2035年のそれぞれの需給バランスを評価した。

第二に，将来の貿易フローを推計することにより，世界の燃料需給の地域的なバランスを評価し，特に今後需要が拡大するアジア地域での需給動向を評価した点である。今後アジアにおいてエネルギー需要は急速に拡大されることが見込まれるが，その中で，石油・天然ガス等の化石燃料については，需要の増加に生産が追いつかず，中東を始めとする諸国への依存度を高めることが予測されている[12]。そのような中で，原子力発電の比率を拡大することがエネルギー資源利用の分散化を意味することは確かであるが，それによって生産や濃縮過程における対外依存度

をどの程度低減できるかは全く別の問題である。この観点から，将来推計を伴う評価を行った点は，既往研究にはない試みであると言える。

II. 試算方法および前提条件

1. 原子力発電設備容量およびウラン需要量の見通し

（1）原子力発電設備容量

福島第一原子力発電所の事故の直後，ドイツは1980年以前に運転開始した国内7基の原子炉の稼働を停止した。当初はこの停止は安全性確認のためとされていたが，その後6月6日，これらの停止中の原子炉をそのまま廃止し，さらに2013年から2021年にかけて残りの原子炉を順次段階的に廃炉する方針を閣議決定した。またイタリアでも，6月に入って原子力発電再開の是非を問う国民投票が実施され，9割以上の反対により当面の原子力再開は不可能となった。このように，日本はもとより諸外国，特に欧州の一部の国において福島の事故は原子力政策に直接の影響を与え，原子力依存からの退却へと大きく舵を切らせることとなったが，一方では従来の原子力推進政策を全く変えていない国も多くあることを忘れてはならない。特に米国・フランス・ロシア・韓国といった従来から原子力発電を積極的に推進してきた国々や，中国・インド等の新興国は，エネルギー安定供給や地球環境問題への対応，さらには自国内の原子力産業育成を通じた国際競争力の維持・強化という観点から，原子力推進政策を変更していない。

このような動向を踏まえ，世界の原子力発電利用国および今後利用する可能性がある国のすべてについて，原子力政策動向や電源開発計画，エネルギー需給動向等をもとに2035年までの原子力発電設備容量を想定し，それを集計することで北米・中南米・欧州・アフリカ・旧ソ連・中東およびアジアの各地域の原子力発電設備容量を推計した。評価に当たっては世界各国が今後も最大限原子力発電設備容量を積極的に拡大することを想定した「高需要シナリオ」と，福島事故が各国の原子力政策に最大限のインパクトを与え，あるいは資金調達等の課題が顕在化し，原子力開発が停滞すると想定した「低需要シナリオ」の2ケースを想定した。概要は以下のとおりである。

(a) 北米

米国は運転中の103基の発電用原子炉を有する世界最大の原子力大国であるが，上述のとおり，一時期「原子力ルネッサンス」とも呼ばれた原子力発電所新設の機運にも関わらず，新規の大量建設に向けた歩みは順調でない。その理由として，非在来型天然ガスの生産が急拡大したことのほかに，原子力は米国にとって，温室効果ガス削減のための最大の手段ではないことなども挙げられる13)。しかし2012年には新設に向けて初の建設・運転一体認可(COL)が発給される一方で，既存炉については60年までの運転延長がすでに半数以上の原子炉に対して認可され，さらに80年までの延長も検討されるなど，今後も原子力発電設備容量を維持・拡大する方針が堅持されている。ここでは低需要シナリオでは米エネルギー省の見通しに準じ14)，2035年までに10 GW程度のみの発電容量増加がみられると想定し，高需要シナリオでは現在計画中の原子炉の建設・運開を見込んで2035年に130 GWまで設備容量が増加すると見込んだ。

またカナダは独自の重水炉を中心とした豊富な原子力開発の経験を有する国である。同国中最大の電力需要をもち18基の原子炉中16基を有するオンタリオ州において，発電設備容量を拡大する計画があり15)，今後発電設備容量は緩やかに増大すると考えられる。

以上により，北米での発電設備容量は低需要シナリオでは2010年の119 GWから2035年には129 GWまで緩やかに増大し，高需要シナリオでは147 GWまで増大すると想定した。

(b) 中南米

中南米地区において現在原子力発電を行っている国は，メキシコ・ブラジルおよびアルゼンチンである。メキシコにおいては，アップレートにより設備容量が若干増加すると想定した。ブラジルでは2基2.0 GWが稼働中であり，建設を中断していたアングラ3号機も建設再開が決定され，2013年に運転が開始される予定である。今後電力需要の伸びに伴い、発電設備容量は大幅に増大する可能性がある。また，アルゼンチンでは2基1 GWの原子炉が稼働中であり，そのうち1基は2030年より前に廃炉を迎えると考えられる。同国ではかつて3つめのプラントとして重水炉(アトーチャ2号)の建設を行っていたが，資金難等の理由により1994年以降建設が中断されている。このプラントについては今後建設再開の動きもみられるが，低需要シナリオでは主に資金面等の問題から実際の建設は行われないものとし，高需要シナリオにおいて若干の新設を見込んだ。

以上により，中南米での発電設備容量は低需要シナリオで2010年の4 GWから2035年には6 GW，高需要シナリオで17 GWまで増大すると想定した。

(c) 欧州

欧州ではかつて，1970年代から80年代にかけて多数の原子炉が建設され，発電設備容量が急速に拡大した。その後原油価格の低迷に伴う原子力発電の経済性の悪化などから，原子力の新規建設は抑制され，複数の国において以後段階的に原子力を廃止するものとする政策が取られるようになった。

最大の原子力推進国であるフランスでは，2012年の大統領選でオランド氏が勝利し，2025年には原子力比率を50％まで低減させると発言した同氏による今後の政策が注目されている。しかし原子炉閉鎖については具体的なスケジュールがいまだ示されておらず，2012年4月には緑の党との原子力に関する協定を解消することを表明してい

ることなどから，今後当面は現状の維持が続く可能性が高いと思われる。ここでは，今後2035年まで現状の高い原子力比率が維持されるものと想定した。一方でドイツ・イタリア・スイス・ベルギー等，福島事故を受けて脱原子力政策の方向性を明確にしている諸国については，低需要シナリオでは2030年には原子力発電設備はゼロになるものと想定した。ただしスウェーデンのように，過去脱原子力政策を決定しながら現実に脱原子力を実現できていない例もあることから，これらの脱原子力国においても，高需要シナリオにおいては現状の政策にも関わらず2035年にも若干の発電設備容量が残ると見込んだ。

今後欧州においては一定程度において新規建設への動きが実現するものの，老朽化した既存炉が大量に廃棄されざるを得ないことから，総体として発電設備容量は横ばい，もしくは微減する程度になると考えられる。上記のような状況を踏まえ，2010年の設備容量 141 GW に対し，2035年に低需要シナリオで 107 GW，高需要シナリオで 161 GW になると想定した。

（d）旧ソ連

旧ソ連地域において大きな発電設備容量をもつのは，ロシアおよびウクライナである。ロシアは世界有数の石油・ガス生産国であり，エネルギー資源を外交政策上の重要な手段と位置付けている。ロシアでは上述のように，原子力の推進策に変化はみられない。同様にウクライナにおいても今後発電用原子炉の新規建設を続けることが想定されており，2030年までに新たに14基の発電プラントを新設するとの計画もある。

この地域においては，今後2035年までの間，特にロシアを中心とした発電設備容量の大幅増強がなされるものと考えられる。ここでは2010年の 37 GW から，2035年に低需要シナリオで 59 GW まで，高需要シナリオではカザフスタンでの新設等も含めて同年に 85 GW まで発電設備容量が拡大すると想定した。

（e）中東・アフリカ・オセアニア

中東地域はいうまでもなく石油・ガスの大産出地域であるが，最近になってエネルギー資源の多角化や海水の淡水化のための利用を目指し，多くの国で原子力の導入を検討し始めている。具体的な動きとしてはロシアからの軽水炉移入を行い，独自に原子力開発を続けるイランのみでなく，UAE，サウジアラビア，クウェート，ヨルダンなど多くの諸国で新規建設が検討されており，UAE では韓国のプラントメーカーに発注して新規建設を行うことが決定されている。ここでは2035年までに低需要シナリオでは UAE のみにおいて新設，高需要シナリオでは他の諸国でも建設が進むものと想定した。

アフリカ大陸では，南アフリカにおいて1984年よりフランス製の軽水炉が稼動している。同国は PBMR（ペブルベッド式モジュール炉）と呼ばれる独自開発のガス炉の導入を今後計画していたが，経済状況の悪化から計画は頓挫している。ここでは2010年の 1.9 GW から低需要シナリオでは設備容量の増加がなされず，高需要シナリオでのみ2035年に 6 GW まで容量拡大が行われると想定した。

（f）アジア

欧米で原子力発電所の新設が止まっていた1990年代においても，アジアにおいては，日本・韓国を中心として原子力発電所の建設が続けられていた。最近になり中国・インドや東南アジア等の新興諸国において原子力発電への関心が急速に高まっており，今後世界の原子力発電所新設の多くはアジアでなされる見込みである。

中国では福島事故前の2011年初頭の時点で13基1,085万 kW が運転中であったが，同時にその 3 倍に相当する30基3,300万 kW の発電所を新規に建設している最中であった。事故直後から同国では新規建設計画の承認が凍結されており，これにより2020年までに7,000万～8,000万 kW という新設計画は若干の遅延を免れない見通しとなったが，その後もすでに認可を受けている発電所の建設は着実に進められており，許認可凍結も安全性の確認とともに近く解除される見通しである。今後上記の新設計画に向けて急速な進展を続けるものと考えられる。同様にインドでも従来より国内資源を利用したトリウムサイクル開発とともに，海外からの軽水炉の大規模移入を目指しており，2011年 7 月には新たにラジャスタン 7・8 号機の建設工事に着手するなど，原子力新設方針は福島事故後も変っていない。

高需要シナリオでは国の計画相当までの大量建設が実現するとした一方で，低需要シナリオでは福島事故後の政策の微修正なども含め，より低い見通しを採用した。一方で東南アジア諸国においては上記のとおり福島事故を受けて原子力推進政策の再検討がなされており，低需要シナリオではすでに具体的に建設計画が進みつつあるベトナムを除き2035年まで新設はなされないものと想定，高需要シナリオにおいては各国 4 基程度の建設を想定した。

これらのことから，アジア地域においては2010年の 85 GW から，2035年に低需要シナリオで 190 GW，高需要シナリオで 347 GW までの急拡大がなされるものと想定した。

これらの結果として，世界全体の原子力発電設備容量は2010年の 390 GW から，2035年には高需要シナリオでは 795 GW まで，低需要シナリオにあっても 500 GW まで拡大を続けることとなる。各ケースにおける原子力発電設備容量の想定を **Table 1** に示す。

なお，高需要シナリオ相当まで原子力発電設備が増加した場合でも，電力需要の伸びを文献12）と同程度に想定すると，世界の発電量全体に占める原子力のシェアは2035年に18％程度に留まる。このため，このケースにあっても，2035年以降さらに原子力発電が増加する余地はあるといえる。

この世界の原子力発電設備容量の見通しを代表的な国際

Table 1 Nuclear generating capacity outlook

Unit: GW

	2010	Low demand scenario		High demand scenario	
		2020	2035	2020	2035
North America	118.6	129.0	129.0	129.1	146.7
USA	105.3	115.8	115.8	114.7	130.4
Canada	13.3	13.2	13.2	14.4	16.3
Latin America	4.4	6.0	5.6	9.2	16.6
Mexico	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6
Brazil	2.0	3.4	3.4	5.8	12.2
Argentina	1.0	1.0	0.6	1.8	2.7
Europe	141.3	126.5	107.3	146.0	161.3
UK	12.0	7.8	6.5	10.4	11.7
Germany	21.5	8.6	0.0	12.7	12.7
France	66.0	67.5	67.5	67.5	69.1
Italy	0.0	0.0	0.0	3.2	6.4
Turkey	0.0	0.0	0.0	2.6	5.2
Sweden	9.4	10.0	8.9	10.0	11.3
Spain	7.7	7.3	7.3	7.3	8.6
Belgium	6.2	4.3	0.0	5.5	5.5
Switzerland	3.4	1.2	0.0	3.4	1.9
Finland	2.8	5.8	5.8	7.4	7.4
Netherlands	0.5	0.0	0.0	0.5	3.1
Slovakia	1.9	1.9	1.9	2.6	2.6
Hungary	1.9	2.0	0.0	2.0	2.0
Czech	3.9	4.0	4.0	4.0	5.1
Burgaria	2.0	4.2	4.2	4.2	4.2
Slovenia	0.7	0.7	0.0	0.7	1.8
Romania	1.4	1.4	1.4	2.1	2.8
Africa	1.9	1.9	1.9	1.9	5.8
S. Africa	1.9	1.9	1.9	1.9	5.8
FSU[a]	37.4	43.7	59.3	61.5	85.5
Russia	23.2	26.2	39.5	42.5	57.7
Ukraine	13.8	16.0	18.2	16.0	20.4
Armenia	0.4	0.0	0.0	0.4	0.4
Kazakhstan	0.0	0.0	0.0	1.1	4.4
Lithuania	0.0	1.5	1.5	1.5	1.5
Belarus	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
Middle East	1.0	1.0	6.6	6.2	31.8
Iran	1.0	1.0	1.0	2.3	4.9
UAE	0.0	0.0	5.6	2.8	8.4
Saudi Arabia	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8
Jordan	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1
Kuwait	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4
Qatar	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6
Oman	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6
Asia	85.4	139.0	190.1	179.2	347.2
China	9.1	60.0	103.6	69.8	158.1
Japan	48.8	31.3	10.3	42.4	31.5
Taiwan	5.1	5.2	3.9	7.7	7.7
S. Korea	17.7	24.0	34.0	32.0	48.0
Indonesia	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
Malaysia	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
Philippines	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
Thailand	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
India	4.1	17.8	34.9	25.8	72.5
Vietnam	0.0	0.0	2.6	0.0	5.2
Pakistan	0.5	0.8	0.8	1.4	3.4
World	390.1	447.1	499.8	533.0	794.8

[a] FSU: Former Soviet Union.

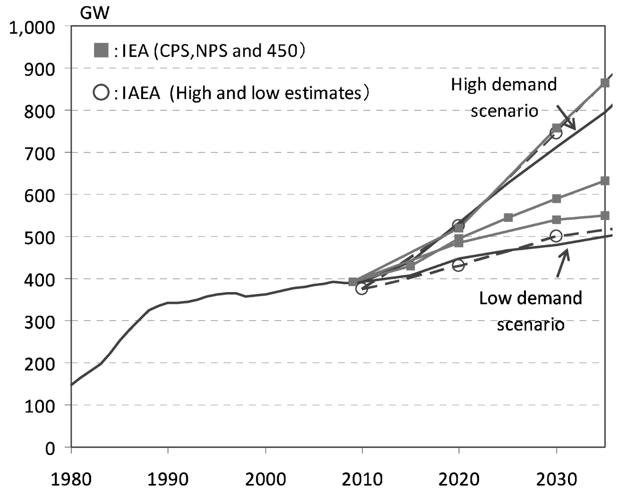


Fig. 1 Comparison with nuclear capacity projections by IEA and IAEA

機関の見通しと比較したものが **Fig. 1** である。

IAEA の見通し4)では低位ケース(Low Estimate)および高位ケース(High Estimate)の 2 つの数字が公開されており，2010年版では2030年の見通しとして現在の 372 GW（ネット）から低位で 546 GW，高位で 843 GW との見通しが示されていた。2011年 3 月の福島事故の後，IAEA は最新版の見通しを公開し，そこでは2030年に低位で 501 GW，高位で 746 GW と，やや下方修正を行っている。Fig. 1 からわかるように，この低位ケースおよび高位ケースはほぼ本研究での低需要シナリオ・高需要シナリオと同等のレベルとなっている。

また IEA の見通し2)では，エネルギー需給の将来について現行政策シナリオ(CPS)，新政策シナリオ(NPS)および450シナリオの 3 つのシナリオが設定されている。この中で，原子力発電設備容量の見通しは CPS が最も小さく，450が最も大きい。Fig. 1 に示すように，最も需要の大きい450シナリオでは原子力発電設備の伸びは高需要シナリオと同程度であり，最も小さい CPS では低需要シナリオをやや上回る。これらのように，本研究で各国の政策動向等から積み上げた原子力発電設備の見通しは代表的な国際機関の公表する見通しとおおむね同程度であり，世界的にみても違和感のないものであることがわかる。

（2）原子力発電電力量

この発電設備容量に設備利用率を乗じることにより，原子力発電電力量を推計することができる。設備利用率としては，すでに原子力発電を行っている国については過去 5 年間の平均値を用い，新規の建設が見込まれる国については80％を想定した。

この発電電力量から，天然ウラン需要量およびウラン濃縮役務需要量(分離作業量)を推計することが可能である。ただし，ウランの濃縮を行う際にテイル濃度を何％に設定するかによって値が異なってくる。一般的に，一定の発電電力量に対して，高いテイル濃度での濃縮を行う場合には

必要な天然ウラン需要量が増大し，濃縮役務量が減少する。すなわち，天然ウラン需要量と濃縮役務需要量とはテイル濃度を媒介としてトレードオフの関係にある。テイル濃度が高い場合(0.3%)と低い場合(0.1%)の天然ウラン需要量および濃縮役務需要量を，低需要シナリオ・高需要シナリオそれぞれについて計算すると**Tables 2**および**3**のとおりとなる。ただしこの計算を行うに当たっては，簡単のためカナダの発電設備はすべて重水炉，その他の国の発電設備は軽水炉と単純化し，軽水炉用燃料のみに対し，ウラン濃縮度4%，燃焼度45 GWd/t，熱効率34.5%と仮定してウラン濃縮役務需要量を計算した。またこれらの表には，参考のため，本研究で電力需要増加のベースとして参照した文献12)における電力需要量(技術進展ケース)と，それによる原子力発電比率を併記した。本研究での「高需要シナリオ」および「低需要シナリオ」は，主に各国の原子力政策の進展によって原子力発電量が高い成長をみせた場合と低い成長に止まった場合を推計したものであり，両ケースにおいて発電電力量自体は同一と想定しているため，高需要シナリオは低需要シナリオに比べて原子力発電比率が高くなっている。

2. ウラン生産量の見通し

近年，ウラン価格の上昇に伴い各国でウランの開発投資が急速に進んでおり，それに伴って2020年までにウランの生産能力は格段に向上する見通しである。ウラン生産能力の見通しについてはOECDによる評価[8)]を参照した(**Table 4**)。

表中，A–IIは確定したウラン開発プロジェクトのみが実現することを想定した見通し，B–IIは計画中のものも含めすべての開発プロジェクトが進展すると想定した見通しである。現在確定，もしくは計画中のプロジェクトは2020年までに開始され，その後既存のウラン鉱山が減退することが見込まれるため，2035年の生産能力は2025年に比べて小さな値となっている。特にこの見通しでは，カザフスタンにおいて現在の18,000 tUから2020年に24,000 tUまで能力が拡大するものの，2035年には5,000～6,000 tUまで減退することとなっている点が特徴的である。実際には，今後どの需要シナリオにあっても世

Table 2　Uranium and uranium enrichment demand (Low demand scenario)

	Electricity generation (TWh)		Nuclear power generation (TWh)		Nuclear share		Uranium demand (tU)				Uranium enrichment demand (tSWU)			
							0.1%		0.3%		0.1%		0.3%	
	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
USA	4,673	5,261	867	912	19%	17%	15,109	15,886	21,326	22,423	21,127	22,214	12,421	13,060
Canada	658	684	81	81	12%	12%	1,554	1,554	1,554	1,554	0	0	0	0
L. America	1,812	2,749	40	38	2%	1%	703	657	992	927	982	918	578	540
Europe	4,270	4,689	887	747	21%	16%	15,453	13,004	21,813	18,356	21,609	18,185	12,705	10,692
FSU	1,675	1,863	276	375	17%	20%	4,816	6,533	6,798	9,221	6,735	9,135	3,960	5,371
Middle East	1,140	1,589	7	46	1%	3%	122	806	172	1,137	171	1,127	100	662
Africa	1,023	1,930	13	13	1%	1%	221	221	312	312	309	309	182	182
Asia	10,096	13,836	1,174	1,627	12%	12%	20,447	28,341	28,861	40,004	28,592	39,631	16,810	23,300
Oceania	392	514	0	0	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
World	25,737	33,115	3,346	3,838	13%	12%	58,424	67,000	81,828	93,934	79,525	91,518	46,756	53,807

Table 3　Uranium and uranium enrichment demand (High demand scenario)

	Electricity generation (TWh)		Nuclear power generation (TWh)		Nuclear share		Uranium demand (tU)				Uranium enrichment demand (tSWU)			
							0.1%		0.3%		0.1%		0.3%	
	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035	2020	2035
USA	4,673	5,261	903	1,027	19%	20%	15,736	17,895	22,212	25,259	22,005	25,024	12,937	14,712
Canada	658	684	88	100	13%	15%	1,687	1,910	1,687	1,910	0	0	0	0
L. America	1,812	2,749	61	107	3%	4%	1,064	1,868	1,501	2,636	1,487	2,611	874	1,535
Europe	4,270	4,689	1,028	1,139	24%	24%	17,903	19,835	25,271	27,997	25,035	27,736	14,719	16,307
FSU	1,675	1,863	389	541	23%	29%	6,779	9,426	9,569	13,305	9,479	13,181	5,573	7,749
Middle East	1,140	1,589	43	223	4%	14%	757	3,882	1,068	5,480	1,058	5,428	622	3,192
Africa	1,023	1,930	13	39	1%	2%	221	677	312	955	309	946	182	556
Asia	10,096	13,836	1,562	2,846	15%	21%	27,211	49,568	38,408	69,966	38,050	69,313	22,371	40,752
Oceania	392	514	0	0	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
World	25,737	33,115	4,088	6,021	16%	18%	71,357	105,059	100,029	147,508	97,424	144,240	57,279	84,804

Table 4　Uranium production forecast（OECD[8]）

Unit: tU/yr

	2010	2020		2035	
		A–II (Production case A)	B–II (Production case B)	A–II	B–II
Argentina	120	500	500	500	500
Australia	9,700	10,100	24,200	9,800	27,600
Brazil	340	2,000	2,000	2,000	2,000
Canada	16,430	17,730	19,000	17,730	19,000
China	940	1,200	1,200	1,200	1,200
Czech	500	50	50	20	20
India	295	980	1,200	1,000	2,000
Iran	20	100	100	100	100
Jordan	0	2,000	2,000	2,000	2,000
Kazakhstan	18,000	24,000	24,000	5,000	6,000
Malawi	0	1,425	1,100	0	0
Mongolia	0	150	1,000	150	1,000
Namibia	5,000	8,000	19,000	5,000	7,500
Niger	4,000	9,500	10,500	5,000	5,000
Pakistan	65	140	155	140	650
Romania	230	350	475	350	630
Russia	3,520	7,600	11,990	6,800	13,400
S. Africa	4,860	4,860	6,320	4,860	6,320
Ukraine	960	810	5,500	170	5,500
USA	2,900	3,800	6,600	3,100	5,600
Uzbekistan	2,300	3,000	3,750	3,500	3,500
World	70,180	98,295	140,640	68,420	109,520

界の原子力発電量自体は増加を続ける中で，一度増加したウラン生産量が大幅に減少することは想定し難く，既存の鉱山の減退は2020年以降の新規開発によって相殺され，生産量は維持もしくは拡大する可能性が高い，と考えられる。ここでは，天然ウラン資源開発の進展として，2020年までA–IIもしくはB–IIに従って生産量が拡大し，その後2035年までその水準を維持するケースを想定し，それぞれウラン生産ケースAおよびBとした。さらに，需要が最も拡大する2035年の高需要シナリオでは，後述のとおり，生産ケースCとして，2020年以降のウラン資源開発により，B–IIからさらに生産量が拡大するケース（地域ごとの拡大幅はA–IIからB–IIまでの拡大幅に比例するものと想定）を設定した。

3. ウラン濃縮設備容量の見通し

現在世界で運転中・計画中のウラン濃縮施設は**Table 5**のとおりである[16~19]。ウラン濃縮設備は少数の国に寡占されていることが特徴的であり，USEC（米），Areva NC（仏），Urenco（英独蘭）およびAtomenergoprom（露）の4企業で世界の濃縮設備容量の95%以上を占める。

米国のPaducah濃縮工場はUSEC社が運営する濃縮施設，フランスのGeorge Besse濃縮工場の設備容量はAreva社の子会社EURODIF社が運営する濃縮施設であり，1952年および1979年の操業開始以来，両国のウラン濃縮において中心的な役割を占めてきた。これらの濃縮施

Table 5　World’s enrichment facilities

Country	Company	Location	Type	Capacity, tSWU/yr
USA	USEC	Paducah	Gaseous diffusion	11,300
		Piketon	Centrifugation	3,800
	Urenco	Eunice	Centrifugation	3,800
	Areva NC	Idaho falls	Centrifugation	6,600
	GE Hitachi Nuclear Energy	Wilmington	Laser	6,000
Europe	Eurodif（Areva NC *etc.*）	Georges Besse（Tricastin）	Gaseous diffusion	10,800
France	Areva NC	Georges Besse II（Tricastin）	Centrifugation	7,500
UK, Germany and Netherlands	Urenco	Capenhurst（UK）	Centrifugation	5,000
		Almelo（Netherlands）	Centrifugation	5,000
		Gronau（Germany）	Centrifugation	4,200
Japan	JNFL	Rokkasho	Centrifugation	1,050
Russia	Atomenergoprom	Angarsk	Centrifugation	2,500
	Atomenergoprom	Novouralsk	Centrifugation	13,200
	Atomenergoprom	Zelenogorsk	Centrifugation	7,800
	Atomenergoprom	Seversk	Centrifugation	3,700
China	CNNC	Lanzhou	Centrifugation	500
		Hanzhong	Centrifugation	500
India	Department of Atoic Energy	Ratnahalli	Centrifugation	25
Iran		Natanz	Centrifugation	n/a
		Natanz	Centrifugation	
		Qom	Centrifugation	
Brazil	INB	Fábrica de Combustível Nuclear	Centrifugation	200
Pakistan		Kahuta	Centrifugation	5
North Korea		Nyeongbyeon	Centrifugation	n/a

設は旧式のガス拡散法を用いており，そのため，経済性の観点から現在フル操業は行っておらず，それぞれ 11,300 tSWU/年および 10,800 tSWU/年の設備容量に対して現在 5,000 tSWU/年および 3,000 tSWU/年程度しか稼働していない[20]。このため，各社は今後増大する需要を見込み，旧式の工場を代替するための遠心分離法による濃縮設備を新設中，または新設を計画している。具体的には，フランスにおいて既存の工場に隣接する George Besse II 濃縮工場が2010年に操業を開始しており，フル操業時の生産能力は 7,500 tSWU/年となる見込みである。また米国においては USEC 社がオハイオ州 Piketon において American Centrifuge Plant と呼ばれる遠心分離法による濃縮工場の新設を計画しているほか，Urenco 社がニューメキシコ州 Eunice に濃縮工場を建設し2010年より操業開始，Areva NC 社はアイダホ州 Eagle Rock に濃縮工場を計画中である（2011年10月に米原子力規制委員会より建設・運転の認可を取得済）。さらに，より新型の濃縮法であるレーザー濃縮法による濃縮設備を GE-Hitachi 社が建設中であり，すでに2010年には試験運転を開始している。

欧州においては英・独・蘭合弁の URENCO 社がそれぞれの国に濃縮設備を有しており，2011年時点の濃縮設備容量は合計で 14,200 tSWU/年である。上記の米国の工場も含めて同社は2015年までに 18,000 tSWU/年まで濃縮設備を拡大する計画を有している[21]。

世界最大の濃縮設備容量をもつ国はロシアである。同国では Angarsk, Novouralsk, Zelenogorsk および Seversk において合計 27,200 tSWU の濃縮設備を有している。2007年にはプーチン大統領の提唱によりロシア国際ウラン濃縮センター（IUEC）が上記の Angarsk に設立されている。これはウラン濃縮技術の拡散を防止するとともに，核燃料の供給停止に備えることを目的としており，IAEA の監視下で濃縮ウランの備蓄を行っている。

中国ではロシアとの技術協力により，蘭州および漢中にそれぞれ 500 tSWU/年のウラン濃縮施設を建設・運転している。さらに2008年にはロシア・メドベージェフ大統領と中国・温家宝首相とが新たな濃縮工場（すでに廃止したものも含め第 4 期目）を建設することで合意・調印しており，これが完成した場合には中国の濃縮設備容量は 1,500 tSWU/年となる。

2011年現在の世界の濃縮設備容量は，経済性等のため稼働低下している分を除くと，およそ 42,200 tSWU 程度である，といわれる[21]。さらに，“Megatons to Megawatts” 計画と称して1994年から2013年までの間，ロシアの解体核兵器から生じる濃縮ウランが米国に輸出されており，それによる燃料供給分が 5,500 tSWU 相当程度あるといわれており，これらによってウランの濃縮役務需要が賄われている。

本試算では，今後，2020年にかけて解体核からの供給は終息するとともに，旧式のガス拡散法による濃縮工場は，主に経済性の問題から順次閉鎖すると見込んだ。その上で上述の新規計画中のプラントが完成した場合，世界の濃縮設備容量は2020年に 72,300 tSWU 程度まで拡大することとなる。この設備容量で十分であるか否かはウラン濃縮役務需要との兼ね合い次第である。

もし将来において濃縮設備容量が不足し，さらなる設備増強が行われる場合（濃縮ケース C：2035年の高需要ケースに相当），その地域区分については以下のとおり想定した。まず，現在濃縮設備を保有し，今後それを拡張する方針を明確にしている国に限定した。日本を除いた場合，これに該当するものは米国，欧州，旧ソ連および中国である。このうち，欧州および米国においては，上記のとおりすでに新規設備の運転を想定している上，今後の原子力発電設備の増加率は中国・ロシア等に比べて大きくない，もしくは設備容量が減少に向う。このため，計画中・建設中の設備運開により供給力が需要を上回る欧州ではそれ以上の濃縮設備建設はなされず，また高需要シナリオにおいて後述のとおり需要が若干上回る米州においては，最新のレーザー濃縮設備と同規模の 6,000 tSWU/yr の濃縮工場が一箇所のみ新設されるものと想定し，残りの需要量拡大分に対応する設備としては，需要の大幅な拡大が見込まれるにも関わらず，濃縮ケース B で大規模な新規建設が見込まれていないロシアおよび中国において設備増強がなされるものと想定した。中でも技術の成熟度から中国よりもロシアにおいてより重点的に設備建設が進むものと考え，仮に設備追加量の70％がロシア，30％が中国で建設されると想定した。

ウラン濃縮設備の想定は **Table 6** のとおりである。既存の濃縮工場建設計画を考慮した場合，濃縮ケース B のとおりウラン濃縮設備容量は 72,300 tSWU/yr まで拡大すると見通される。ただし現在，ロシアにおける濃縮設備は 18,000 tSWU/yr 程度しか稼働していない[20]ことから，ウラン濃縮役務需要が緩和したケースではロシアでは現状以上の稼働を見込まず，実質的に 63,100 tSWU/yr 程度の設備容量とした（濃縮ケース A）。一方で2035年の高需要シナリオにおいて，既存の計画のみでは濃縮設備が不足する場合には，濃縮ケース C として，上記の考えに基づき必要な濃縮設備の拡大を想定した。

Table 6　Enrichment capacity projection

Unit: tSWU/yr

	2011	Enrichment case A	Enrichment case B	Enrichment case C
Americas	5,400	20,400	20,400	26,400
Europe	18,200	21,700	21,700	21,700
FSU	18,000	18,000	27,200	35,472
Asia	2,050	3,000	3,000	6,545
Total	43,650	63,100	72,300	90,117

4. 天然ウランおよびウラン濃縮役務価格の見通し

天然ウランおよびウラン濃縮役務は多くの場合，長期契約により調達されるが，一部はスポット市場において購入され，その価格が公開されている[22]。長期契約で調達される場合であってもスポット価格を参考として取引がなされる場合が多いため，スポット価格の推移は天然ウランおよびウラン濃縮役務価格全体の動向を反映しているものと考えられる。その過去の推移は Fig. 2 に示すとおりである。

天然ウラン価格は2003年までは10ドル/ポンド前後と，非常に安い水準にあった。これは1990年頃までは軍事用目的を兼ねたウラン生産の水準の高さが常に商業的需要量を大幅に上回っていたこと，またその後は二次供給の利用が可能となることで需給の緩和状態が続いたことによる。しかしその後，地球環境問題への配慮等から各国で原子力発電が政策的に推進され，それによって原子力発電の見通しが大きく上方に修正され始めたことに加え，天然資源の有限性とウラン供給のチェーンが少数の重要施設に依存しているという事実への意識の高まりや，原油価格等他の一次エネルギー価格の上昇，投機筋の介入などにより，2004年以降天然ウラン価格は急騰を続け，2007年には140ドル/ポンド近くまで高騰した。急騰した価格はやがて調整局面に入ったが，以前よりは高い水準で安定をし，2012年6月現在，およそ51ドル/ポンドとなっている。

ウラン濃縮役務価格は天然ウラン価格に比べると変動が小さく，かつては80～110ドル/kgSWU の水準で推移していたが，やはり2005年以降，天然ウラン価格ほど急速ではないものの上昇傾向を示し，一時期は160ドル/kgSWU を超える水準に達した。その後緩やかに下落を続け，2012年6月現在130ドル/kgSWU 程度まで低下している。

本研究では Fig. 2 に示すとおり，将来の価格をそれぞれ2つ設定した。まず天然ウラン価格については，今後ウランの二次供給が終了し，一方で発電用需要の増加が見込まれることから，低価格ケースではかつての10ドル/ポンドの水準まで低下はしないものの，価格調整後の最安値である40ドル/ポンド程度で落ち着くものと想定した。一方で高価格ケースでは，価格高騰時の140ドル/ポンド程度まで価格が再び上昇するものと想定した。

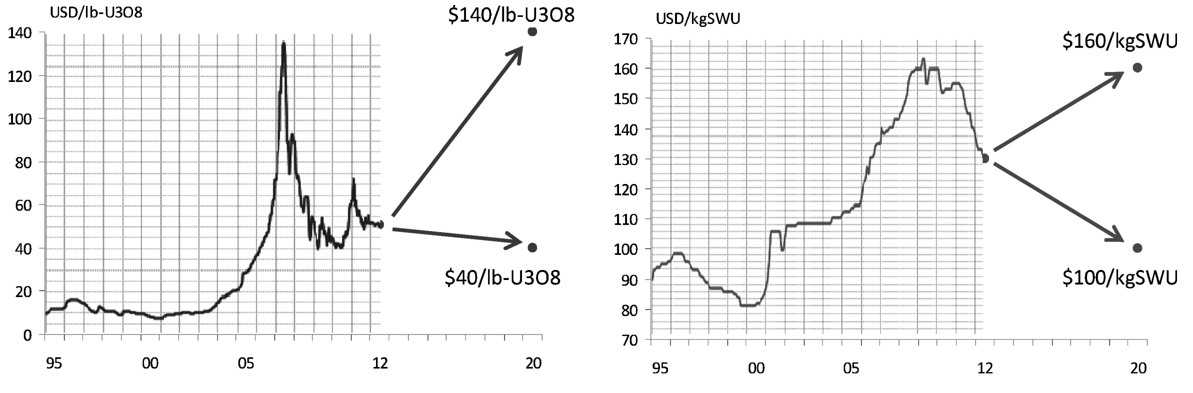
ウラン濃縮役務価格については，低価格ケースでは価格高騰前の100ドル/kgSWU まで価格が下落，高価格ケースでは高騰時の160ドル/kgSWU 程度まで上昇すると想定した。

天然ウラン需要量とウラン濃縮役務需要量とは，テイル濃度を通じてトレードオフの関係にある。そのため，天然ウラン価格（単価）とウラン濃縮役務価格（単価）とが決まった場合には，テイル濃度に応じて両者の需要量から合計の費用（天然ウラン購入費＋濃縮役務費用）が算出され，これを最小化する条件により，最適なテイル濃度が導出できることとなる。いま，2020年および2035年の時点を想定し，極端な場合として天然ウラン価格が高く（140ドル/ポンド）ウラン濃縮役務価格が安い（100ドル/kgSWU）場合を価格ケースⅠ，その逆の場合（天然ウラン40ドル/ポンド，ウラン濃縮役務160ドル/kgSWU）を価格ケースⅡとすると，それぞれのケースでの最適なテイル濃度はそれぞれ0.11％および0.27％となる（**Fig. 3**）。本試算では，これらの2つの価格ケースをテイル濃度の上限および下限とし，将来のウラン需要量および濃縮役務需要量を推計した。ちなみに最適なテイル濃度はウラン濃縮役務価格（ドル/kgSWU）と天然ウラン価格（ドル/ポンド）との比によって決定され，その比は価格ケースⅠおよびⅡでそれぞれ0.7および4.0となっている。

5. 貿易フローの試算方法

以上の前提条件のもと，2020年および2035年の天然ウランおよび濃縮ウランの貿易フローに関する推計を試みた。

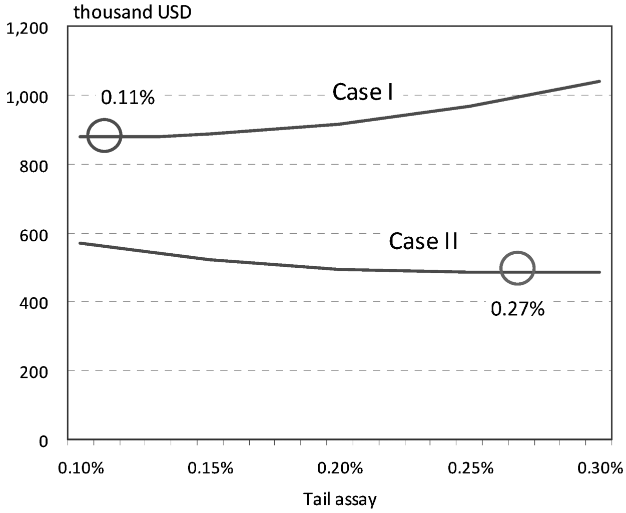
通常，例えば石油製品や天然ガスに関する世界の貿易フローを予測する際には，コストによる最適化を行うのが一般的である[23,24]。例えば世界の国ごとに石油・ガス等の生産コスト・出荷コスト・輸送コスト・精製コスト等を積み



U_3O_8

Enrichment

Fig. 2 U_3O_8 and uranium enrichment spot prices[22]



	A : U3O8 price USD/lb	B : Enrichment price USD/kgSWU	B÷A	Tail assay %
Case I	140	100	0.7	0.11
Case II	40	160	4.0	0.27

Fig. 3　Two cases for U_3O_8 and enrichment prices

あげ，トータルでのコストが最小となるような需給バランスを線形計画法によって求め，貿易フローを作成する，というような方法が用いられる。ここでは，例えばLNGの供給元の選択は現地での生産コストと，そこから需要地までの輸送に関わるコストとの兼ね合いによって決定される。しかし石油や天然ガスとは異なり，原子力については公開されていないデータが多く，出荷・輸送や転換・濃縮・再転換等に関わるコストの正確なデータを得ることは事実上不可能である。一方で広く指摘されるとおり，ウラン燃料は化石燃料に比べてエネルギー密度が圧倒的に高いため，輸送に関わるコストそのものは相対的に低い水準にある。例えば文献25)では，欧州とロシアの濃縮施設の間での六弗化ウランの輸送費を1.5ドル/kgとしている。これは，発電量に換算すると，インドネシアから日本までのLNGの輸送費0.5ドル/MMBtu26)の約1/100程度に相当する。一方で，同じく単位質量当たりの輸送費であっても使用済み核燃料の場合には大陸間横断費用として200ドル/kgかかる27)など，原子力関連の輸送費は距離よりもむしろ安全対策・安全規制等の動向に大きく依存する状況となっている。

実際の電力会社のウラン燃料調達は，主に長期契約に基づいて行われる。その際，調達先を選定するに当たって重視されるのは燃料自体の価格のほか，過去の契約関係や権益の状況，二国間の政治的協力関係等であり，輸送等にかかるコストは全く影響を与えないものではないものの，必ずしも最重要視される要因ではない。このことから，上記の石油製品の貿易フロー分析のように，輸送コストの差異によって貿易のバランスを推計する手法は，ウラン燃料の分析に当たっては必ずしも適切ではない。

このため，本研究では直近の貿易フローの実績値（ある国が，天然ウランやウラン濃縮役務をどの国からどの程度の比率で供給されるか）を用い，これを拡大する形で将来推計を行った。すなわち，過去の貿易の実績には，上記の政治的・地政学的影響や既存の契約・権益関係等，種々の要因に関する情報が含まれているものと考え，長期的契約の形態が継続することにより，今後もこれらの状況が大きく変化するものではないと想定した上で，2020年および2035年にも2009年の実績値に近い比率で供給が行われるものとして試算を行った。具体的には，まず後述のとおり各ケースについて想定されるテイル濃度を設定することにより，世界全体および各地域の天然ウラン・ウラン濃縮役務の需要量を推計した。その上で，それぞれの供給量が世界全体で需要量と一致すると想定し，供給量が上記の生産ケース/濃縮ケースAの容量を下回る場合には各地域一律の稼働率低下により供給量が減少すると想定，ケースAとBの間に位置する場合にはその比に応じて各地域で一律に供給量を按分，ケースBを上回る場合には上記のとおり新たにケースCを設定し，地域別の供給量を想定した。なお，ウラン生産量については，過去世界全体の生産量は生産容量の9割を超えたことはなく，2003年以降はおおむね75～84％程度の水準となっている8)。ここでは，ウランの実際の生産量上限はTable 4で示したウラン生産容量の80％と想定した。

このように想定された地域別の天然ウランおよびウラン濃縮役務需要量を境界条件として，下記の目的関数χを最小化するようなフローを計算した。

$$\chi=\sum_{i,j}(x_{i,j}-x_{i,j}^{0})^2 \qquad (1)$$

ただし$x_{i,j}^{0}$はi地域への輸入量全体に占めるj地域からの輸入量のシェア（2009年実績値），$x_{i,j}$はその将来推計値（2020年または2035年）である。

貿易量の実績値としては，文献28)のデータを加工して推計した。ここでは，天然ウラン・ウラン転換役務，ウラン濃縮役務，PWR用燃料成型加工役務およびBWR用燃料成型加工役務について，関係する事業者ごとに，地域別供給量が推計されている。これをもとに，天然ウランおよ

びウラン濃縮役務の地域間貿易を推計すると，**Tables 7** および **8** のとおりとなる。なお，取引上の実態に即して，天然ウランのフローはウランの生産国から，濃縮工場ではなく，実際に燃料が消費される国までのフローとして示されることに注意を要する。

なお，2009年の実績値では，欧州から米国への濃縮役務のフローがみられるが，これはAreva社の濃縮工場で濃縮されたウランが米国で利用されているためである。しかしTable 5に示すとおり，同社は米国市場を視野に入れて米国内での濃縮工場建設を進めており，本試算ではその運開を想定しているため，将来推計において欧州から米国へのウラン濃縮役務供給はないものと想定した。また濃縮中東地域については，これまで原子力発電および天然ウラン生産・供給の実績がないため，(1)式の輸入シェア(実績)の数値を得ることができない。ここでは仮に，中東から天然ウランの輸出が行われる際には需要の多いアジアおよび欧州地域を対象とするものと想定し，$x^0_{i,j}$の値としては中東での生産量をそれぞれの地域の需要量で除した値を用いた。また中東への天然ウラン輸入が行われる場合には，資源量の豊富な旧ソ連・アフリカ・オセアニアの3地域から，ウラン濃縮役務輸入が行われる場合には輸出余力の大きい旧ソ連・欧州の2地域から輸入が行われるものと想定し，$x^0_{i,j}$の値としてはそれぞれ1/3，1/2とした。

本試算による将来の貿易フロー推計では，地域間の輸送コストを影響要因として扱っていない。これは，上記のようにウラン燃料フローが決定される際に，輸送コストが与える影響は比較的小さいものと想定されるからであるが，この想定の是非による将来推計の不確実さを確認するため，「参考ケース」として，貿易フローが地域間の輸送コストによって決定されるケースについても試算を行った。この参考ケースにおいては，まず地域ごとの需要量と供給量については上記の計算と同様に設定し，その上で，単純のため地域間の輸送距離に比例して輸送コストがかかるものと想定し，世界全体での輸送コストが最小となるようなフローを推計した。地域間の距離は石油タンカーに関して広く用いられる文献29)に準じて設定し，単純のため各地域についてサンクトペテルブルク，ハンブルク等の代表的な港の間の距離の値を用いた(実際にウランが出荷・入荷する港は近傍する他の港である可能性はある)。なお旧ソ連については，海上輸送のほかに，港までの陸上輸送を考慮し，天然ウランについてはカザフスタンから，ウラン濃縮についてはアンガルスクからの距離を加算した。通常，

Table 7 Uranium trade (2009)

Unit: tU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	Unknown	World
USA	1,921										1,921
Canada	3,867	1,600	21	3,664	19			1,819		1,913	12,904
L. America			330								330
Europe				1,174							1,174
FSU	3,789		62	8,480	8,856		131	12,013		5,466	38,796
Middle East											0
Africa	1,425		52	2,188	62			2,904		3,315	9,946
Asia								1,274			1,274
Oceania	522		47	2,048	61			3,924		2,900	9,503
Unknown	51		10	883	13			2,496		101	3,554
World	11,576	1,600	522	18,438	9,011		131	24,431		13,695	79,402

Table 8 Enrichment trade (2009)

Unit: tSWU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	Unknown	World
USA	7,063			909				4,536		1,219	13,727
Canada											0
L. America			236								236
Europe	5,133		160	16,875				2,958		1,146	26,272
FSU	5,500		2	4,213	5,540		94	1,078		4,899	21,326
Middle East											0
Africa											0
Asia								955			955
Oceania											0
World	17,696	0	398	21,997	5,540	0	94	9,527	0	7,264	62,516

Table 9　Scenario setting

Scenario		Uranium production capacity	Enrichment capacity	Tail assay %
Low demand	2020	Case A	Case A	0.22
	2035	Case B	Case B	0.27
High demand	2020	Case B	Case B	0.27
	2035	Case C	Case C	0.27

石油等の輸送については陸上輸送の方が海上輸送よりも高価であるが，ウランに関する輸送はロットが小さいことから海上輸送の経済性が相対的に悪化し，ここでは仮に陸上・海上で同程度になると想定した。また，後述のとおり，ウラン濃縮設備を新規建設する米国および欧州では設備の稼働量のうち最低限50％以上が自地域の需要に宛てられるものと想定した。

6．ケース設定

今回の試算におけるケース設定を**Table 9**に示す。低需要シナリオと高需要シナリオの双方につき，2020年および2035年の需給バランスを推計し，貿易フローを計算した。

次項で詳述するとおり，2020年の両シナリオおよび2035年の低需要シナリオでは，既存のウラン資源開発プロジェクトおよび濃縮設備建設計画の範囲内で供給を賄うことが可能となる。

特に低需要シナリオ（2020年）においては，天然ウラン，ウラン濃縮役務ともに需給が大幅に緩和されることとなる。このケースでは天然ウラン生産能力・ウラン濃縮設備容量ともにそれぞれ最低限の生産ケースA・濃縮ケースAとしたが，それでも需給は緩和し，設備はフル稼働を必要としない。それに対し，低需要シナリオ（2035年）および高需要シナリオ（2020年）では計画どおりの容量拡大を見込んでそれぞれケースBを想定した。2035年の高需要シナリオでは，既存の計画のみでは天然ウラン生産およびウラン濃縮役務ともに需要を満たすことができない。このため，これらのケースでは既存の計画以上に追加的に生産能力・濃縮設備が拡張されるケースCを想定した。それぞれの場合において，天然ウランおよびウラン濃縮役務の需給状況からテイル濃度の想定を置き，試算を実施した。想定の詳細についてはIII章の各シナリオの項に示す。また，2035年の高需要シナリオについては，比較のため，輸送コストによって地域選択を行う「参考ケース」の推計も別途行った。

7．回収ウランの利用可能性について

回収ウランは使用済燃料を再処理した際に発生するウランであり，通常天然ウランよりも高い1％前後のU235を含んでいる。この回収ウランを濃縮し，利用に供することにより天然ウランの需要量を低減することができる。

文献30）によれば，再処理から得られるMOX燃料は，2008年末までにフランス・ドイツ・スイス・ベルギー・米国等の58基において累計6,350本の装荷がなされている。同文献で推定されている装荷率実績値を用い，原子炉1基の設備利用率を仮に80％として，MOX燃料を用いた原子力発電量を推定すると，年間83 TWh（2009年の原子力発電量の約3％）となる。

再処理による燃料の製造は天然ウランを濃縮する場合に比べて単価が高いため，一般的には回収ウランの利用を拡大するに従いトータルのコスト負担は上昇する。ただし，天然ウラン価格が150ドル/ポンドを超える高い水準にあった場合には，回収ウランの利用拡大が天然ウランの利用と同等程度のコストとなる場合もあり得る11)。2010年現在，世界には英セラフィールド，仏ラ・アーグ，露チェリャビンスクなどに4,600 tHM/yr程度の再処理施設が存在している（ロシアでさらにRT−2再処理施設（1,000～1,500 tU/yr）の新設計画があるが，経済性等の理由により新規建設が中断している）17)。これらの設備を安定的・継続的に稼働させた場合，例えば稼働率80％では最大3,700 tU程度の回収ウランが利用可能となることになる。これは，Tables 2および3に示す天然ウラン需要量（2020年および2035年）の3～6％程度の量となり，その分だけ生産必要量が減少することになる。また，回収ウランのU235濃度は1％前後であることから，天然ウランのU235濃度0.72％との差によりウラン濃縮役務需要も減少することになるが，天然ウラン需要自体の減少率に比べれば微量である。以下，本試算では回収ウランの利用が需給に及ぼす影響を明示的に考慮に入れていないが，これを考慮に入れた場合，特に天然ウランの需要量が若干低減する可能性があることは留意を要する。現状の再処理施設のみではその影響は必ずしも大きくないものの，今後，仮にそのコストの動向等に応じて再処理施設の大規模新規建設が計画された場合には，改めて考慮する必要があるだろう。

III．試算結果および考察

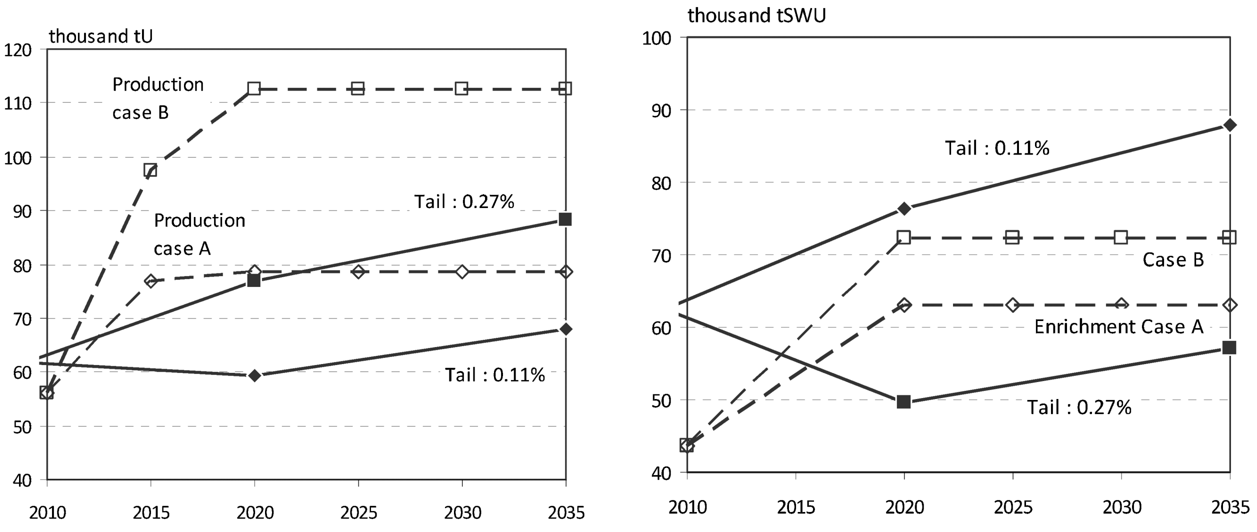
1．低需要シナリオの貿易フロー推計

低需要シナリオにおいては，世界の天然ウランおよびウラン濃縮役務の見通しは**Fig. 4**のとおりとなる。

（1）2020年

2020年の天然ウランの需要量は価格ケースIおよびII（テイル濃度0.11％および0.27％）でそれぞれ59,232 tUおよび76,978 tU，ウラン濃縮役務量は76,372 tSWUおよび49,685 tSWUである。

一方で天然ウランの生産能力（稼働率0.8を乗じたもの）は78,636～112,512 tUである。今後新たなプロジェクトが進展しない生産ケースAの78,636 tU程度の生産量でも，いずれの価格ケース（テイル濃度）を仮定しても，天然ウラン需要を賄うことができる。一方で，ウラン濃縮役務



Uranium production

Enrichment

Fig. 4 Uranium production and enrichment projections (Low demand scenario)

Table 10 Uranium trade (Low demand scenario: 2020)

Unit: tU

From: \ To:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	2,690									2,690
Canada	5,855	1,554		3,752				1,389		12,549
L. America	542		840					387		1,769
Europe				283						283
FSU	3,596			6,580	5,760		264	8,863		25,063
Middle East				702		146		638		1,486
Africa	4,590			4,916				7,328		16,835
Asia								1,748		1,748
Oceania	798			2,249				4,102		7,149
World	18,070	1,554	840	18,483	5,760	146	264	24,455	0	69,573

需要は，価格ケースIでは建設中・計画中の濃縮設備を加えた設備容量(濃縮ケースB)の設備容量を若干上回るものの，価格ケースIIでは大きく下回る。

これらのことから，低需要シナリオでは特に天然ウラン需給が大幅に緩和し，価格はケースIIで想定した40ドル/ポンドよりもさらに下回る可能性が高い。また，天然ウラン供給力が過剰になることから，高いテイル濃度での濃縮が行われ，需給の緩和によりウラン濃縮役務価格も低下する可能性が高い，といえるだろう。このような状況下では，天然ウラン資源開発プロジェクトが停滞し，かつ，現在特に米国において大規模に計画されている濃縮設備計画が遅延・中止する可能性も高い，ともいえる。

このケースでは，テイル濃度の最も低いケースではウラン濃縮役務量が設備容量見通しを上回る一方で，天然ウラン自体は需要が供給を大幅に下回るため，このような価格は市場によって選択されず，テイル濃度は高めで推移するものと推察される。ここでは仮に，天然ウラン需要量とウラン濃縮役務需要量とがそれぞれ生産ケースAおよび濃縮ケースAに対して同等の比率となる(0.88倍：需給の緩和により，ともに最低の供給可能量よりも小さな供給量となる)ようなテイル濃度を計算(0.22%)し，それを用いて貿易フローの計算を実施した。これは，ウラン濃縮役務価格(ドル/kgSWU)が天然ウラン価格(ドル/ポンド)の2.5倍程度となるテイル濃度であり，ウラン濃縮役務価格が相対的に高い場合であるが，仮に上記のとおり天然ウラン価格が40ドル/ポンドを下回るとすると，ウラン濃縮役務価格は100ドル/kgSWUを下回る。このため，ウラン濃縮価格も現状の130ドル/ポンドからは価格が大きく下落するケースであると考えられる。

貿易フローの試算結果は**Tables 10**および**11**のとおりである。

需要が急速に拡大するアジア地域は旧ソ連(ロシア・カザフスタン等)およびアフリカ，次いで豪州から，また欧州は旧ソ連およびアフリカから，米国はカナダから天然ウランの供給を受けることとなる。2020年の天然ウラン需給は緩和されるものと見通され，特に低需要シナリオでは

Table 11　Enrichment trade（Low demand scenario: 2020）

Unit: tSWU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	9,700			819				7,353		17,872
Canada										0
L. America			177							177
Europe			446	11,438		60		7,256		19,199
FSU	5,132		67	2,913	4,728	60	217	2,809		15,925
Middle East										0
Africa										0
Asia								2,654		2,654
Oceania										0
World	14,831	0	690	15,170	4,728	120	217	20,072	0	55,827

現在確定しているプロジェクト以上のものが実現しないことも想定されるが，この場合には豪州での生産量は現在から大きく伸びることはなく，旧ソ連地域およびアフリカから他地域への輸出量が増加する。

また，仮に計画どおりヨルダンで2,000 tUの生産が開始すると想定した場合，この生産量は中東地域の需要を大きく上回り，他地域(欧州・アジア等)に輸出することが必要となる。

この低需要シナリオであってもウラン濃縮役務需要は，アジアを中心に増大することが見込まれ，したがって同地域への欧州・ロシア・米国等からの濃縮役務輸入が2020年にかけて増大する。しかし，この域内のウラン濃縮役務需要を満たすためにアジア地域(特に中国)でさらに大幅な濃縮能力拡大を行おうとすると，世界のウラン濃縮役務量が供給過多になる可能性が懸念される。このため，アジア諸国が濃縮役務の輸入依存度を大幅に低減させることは困難である。

（２）2035年

2035年の天然ウランの需要量は価格ケースIおよびII(テイル濃度0.11％および0.27％)でそれぞれ67,931 tUおよび88,352 tU，ウラン濃縮役務量は87,890 tSWUおよび57,178 tSWUである。

2035年の天然ウラン生産能力については，上記のとおり，生産ケースAおよびBで，2020年の生産能力A-IIおよびB-II相当を維持するものと想定し，78,636～112,512 tUとする。仮に需要が拡大しない場合には，生産能力が減退し，稼働率80％を乗じた生産能力は2035年に最低でA-IIの54,736 tUまで落ち込むことになるが，これはかつてのように，天然ウラン価格が二次的供給等の理由により極めて低い水準で低迷した場合であると考えられる。

2035年の低需要シナリオにあっては，価格ケースIでは天然ウラン需要量67,000 tUは生産能力の下限(78,636 tU)を超えることがなく，また価格ケースIIでも天然ウラン需要量93,934 tUと，生産能力の下限を若干上回る程度である。すなわち，テイル濃度のいかに関わらず，天然ウランの供給過剰状態が続く。一方でウラン濃縮役務量については，価格ケースIIでは需要量は濃縮ケースAを大きく下回るが，価格ケースIでは逆に濃縮ケースBを大きく上回る。このことから，低需要シナリオでは，2035年にあってもテイル濃度が大幅に低下することはなく，依然として高い水準で推移するものと考えられる。仮に現在計画中のプロジェクトがすべて進展したと想定したケース(生産ケースBおよび濃縮ケースB)の供給可能量に対して同率の水準になると想定した場合には，それぞれの需要量は供給可能量の79％に止まり，テイル濃度は価格ケースII相当の0.27％程度となる。

現在計画中の濃縮工場が遅延を含めても2035年までに運転開始したと想定した場合，2035年にあっても天然ウランおよびウラン濃縮役務の需給はやはり逼迫することはなく，むしろ需給の緩和により生産量が減退することになる。この場合，2035年までの間にさらに濃縮プラントが建設されることは難しいであろう。また，需給の緩和により天然ウラン価格・濃縮役務価格は下落することが想定されるが，0.27％のテイル濃度はウラン濃縮役務価格(ドル/kgSWU)と天然ウラン価格(ドル/ポンド)との最適な比が4倍程度となることを意味する。この場合には，仮にウラン濃縮役務価格が現在と同水準の130ドル/kgSWUを維持したとしても，天然ウラン価格は30ドル/ポンド程度と，大きく下落することになる。すなわち，低需要シナリオにあっては，既存のウラン資源開発・濃縮設備建設計画のみの進展によっても供給過剰状態が2035年まで続き，需給緩和に伴い価格が下落することが想定される。したがってこのケースでは，計画中の両プロジェクトが遅延するのみでなく，2035年までの間に中止となる可能性も高い，といえるだろう。

このテイル濃度0.27％の場合の試算結果は，**Tables 12**および**13**，**Figs. 5**および**6**のとおりである。

このケースでは，2020年に比べて，世界の天然ウラン需要量増加の7割はアジアにおけるものとなる。アジア

Table 12 Uranium trade (Low demand scenario: 2035)

Unit: tU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	3,703									3,703
Canada	6,808	1,554		3,583				2,540		14,485
L. America	465		874					661		2,000
Europe				350						350
FSU	3,890			6,473	8,695	0	294	11,303		30,655
Middle East				606		1,072		2		1,680
Africa	5,074			3,946		0		13,117		22,138
Asia								2,233		2,233
Oceania	1,202			2,351		0		7,866		11,419
World	21,144	1,554	874	17,309	8,695	1,072	294	37,721	0	88,662

Table 13 Enrichment trade (High demand scenario: 2035)

Unit: tSWU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	8,242			91				7,585		15,918
Canada										0
L. America			158							158
Europe			363	8,411		349		7,977		17,100
FSU	5,587		51	2,819	5,687	353	192	6,745		21,434
Middle East										0
Africa										0
Asia								2,364		2,364
Oceania										0
World	13,829	0	572	11,321	5,687	701	192	24,672	0	56,974

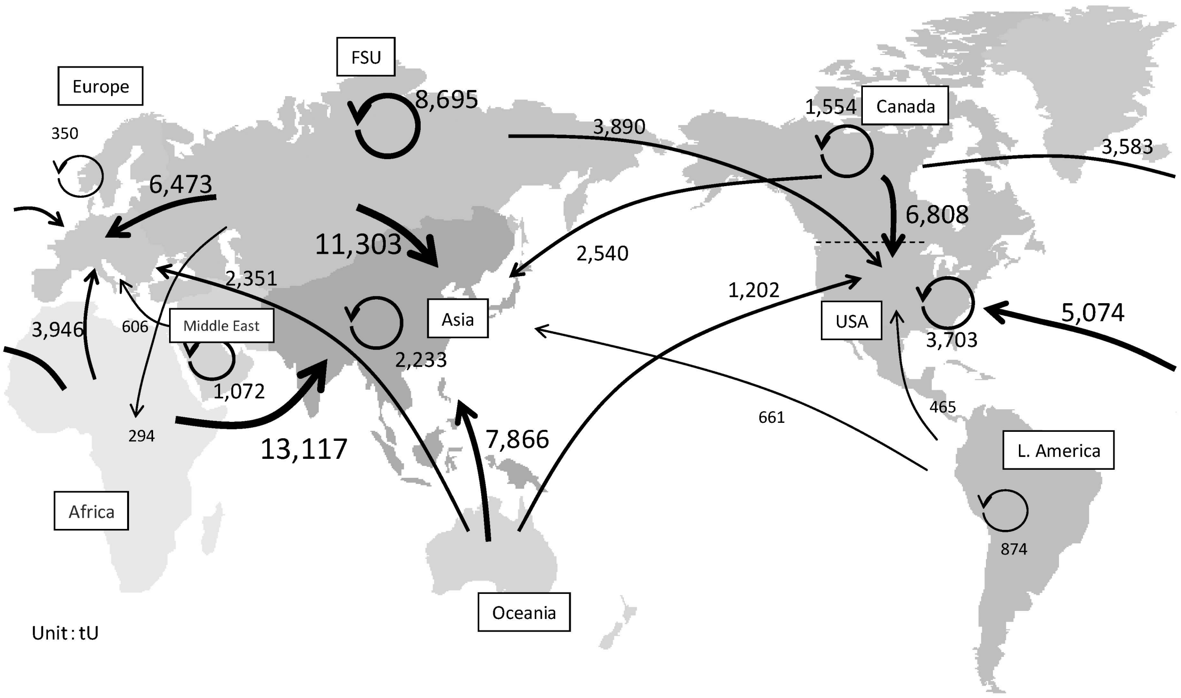


Fig. 5 Uranium trade (Low demand scenario: 2035)

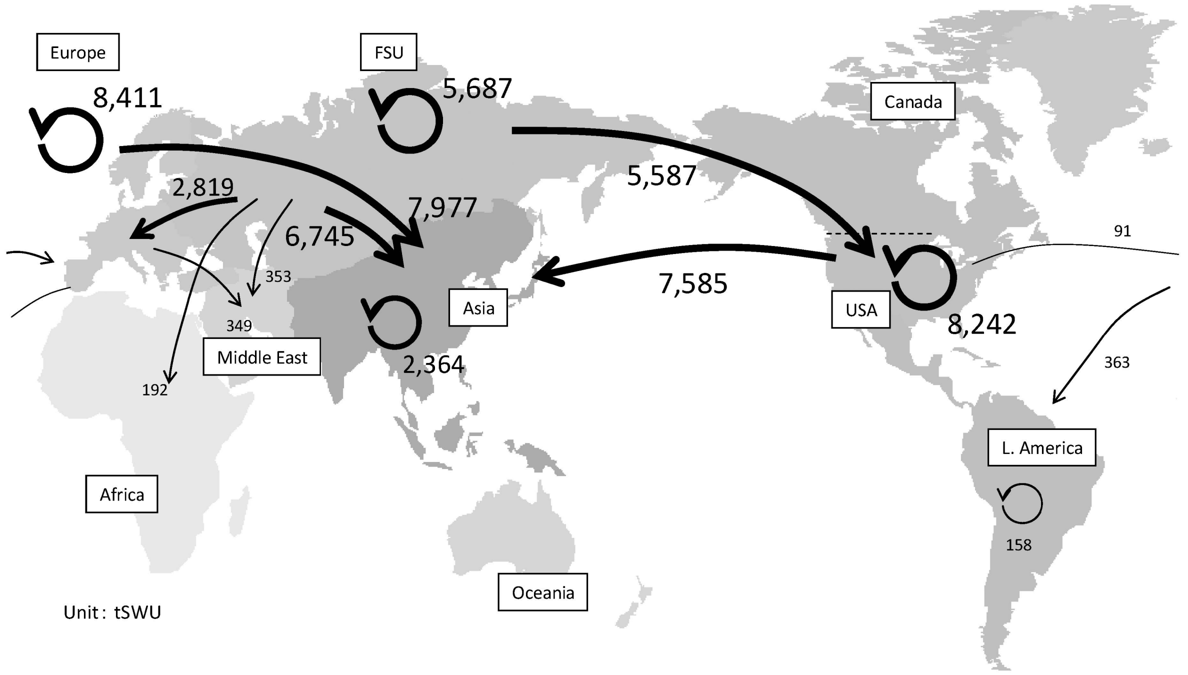
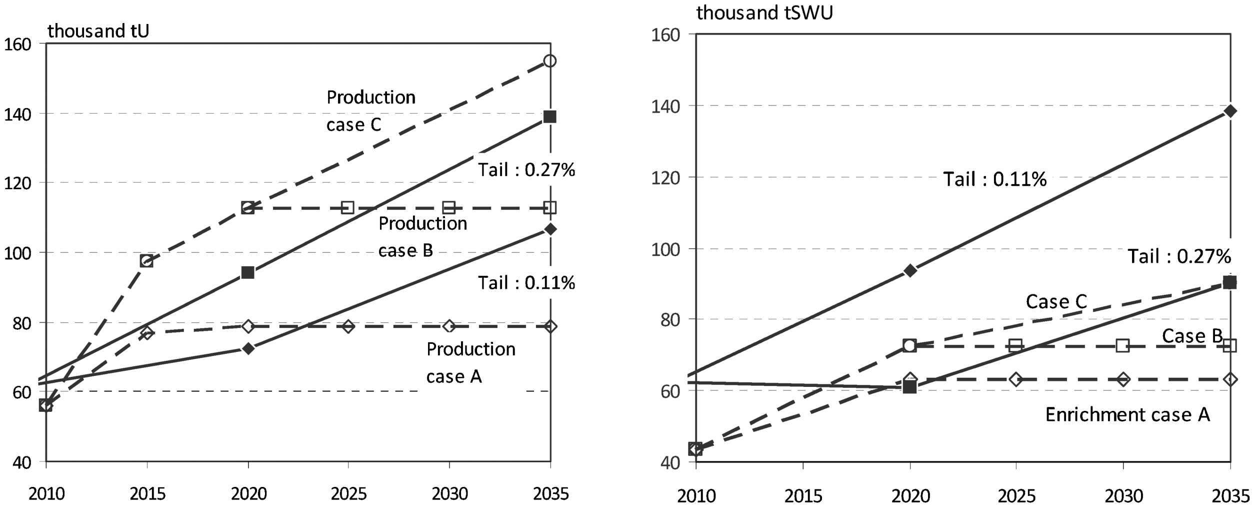


Fig. 6　Enrichment trade (Low demand scenario: 2035)



Uranium production　　Enrichment

Fig. 7　Uranium production and enrichment projections (High demand scenario)

の需要増はアフリカ・豪州等からの供給増で賄われる。一方で欧州での需要量は2020年に比べて減少し，それに伴い旧ソ連，アフリカ等からの貿易量も微減する。

ここではテイル濃度が2020年よりも上昇する想定のため，ウラン濃縮役務需要量の増加は比較的小さい。アジアで需要が増加する一方で，米国および欧州での需要は減少する。特に欧州での需要減少が著しく，欧州およびロシアからアジアへの濃縮役務輸出が拡大する。

2. 高需要シナリオの貿易フロー推計

高需要シナリオにおいては，世界の天然ウランおよびウラン濃縮役務の見通しは**Fig. 7**のとおりとなる。

（1）2020年

高需要シナリオの2020年の天然ウランの需要量は価格ケースIおよびII（テイル濃度0.11％および0.27％）でそれぞれ72,348 tUおよび94,086 tU，ウラン濃縮役務量は93,561 tSWUおよび60,868 tSWUである。

天然ウラン需要量はテイル濃度の高い価格ケースIIでも生産ケースBを下回る。すなわち，現在計画中のウラン資源開発プロジェクトが進展した場合には，高需要シナリオであっても供給が需要を上回ることになる。一方でウラン濃縮役務量に関しては，テイル濃度の高い価格ケースIIで濃縮ケースAと同程度，テイル濃度の低い価格ケースIでは濃縮ケースBを大きく上回る。すなわち，相対

的に天然ウランの方がウラン濃縮役務よりも需給が緩和する状況にあり，したがってこのケースでもテイル濃度は高めで推移することが見通される。

仮に，天然ウラン生産量およびウラン濃縮役務量が，ともに現在計画中のプロジェクトがすべて進展したと想定したケース（生産ケースＢおよび濃縮ケースＢ）の供給可能量に対して同率の水準になると想定した場合には，それぞれの需要量は供給可能量の84％（94,400 tU および 60,662 tSWU），テイル濃度はやはり0.27％程度，すなわち価格ケース II とほぼ同程度の水準となる。

現在計画されている新規プロジェクトは現在の価格水準で適度な利潤を得られるよう計画されているものと仮に想定すると，それらの進展を見込んだ生産ケースＢおよび濃縮ケースＢ程度までの需要の拡大が現状の価格水準を維持し得る需要レベルであることになり，それよりも需要量が低下した場合には，比較的安価なプロジェクトのみが進展し，価格は低下することが想定される。このケースでも前項と同様，0.27％のテイル濃度はウラン濃縮役務価格（ドル/kgSWU）と天然ウラン価格（ドル/ポンド）との最適な比が４倍程度となることを意味し，仮にウラン濃縮役務価格が現在と同水準の130ドル/kgSWU を維持したとしても天然ウラン価格は30ドル/ポンド程度と，大きく下落することになる。すなわち，現状のウラン濃縮工場の運転開始を考慮に入れた場合，高需要シナリオにあっても天然ウラン需給は緩和し，価格の下落とともに資源開発投資が停滞する可能性が高い，といえる。

貿易フローの試算結果は **Tables 14** および **15** のとおりとなる。

需要の増加に対応して，天然ウランの貿易量は低需要シナリオに比較して増大する。特に旧ソ連・アフリカ・豪州の各地域からアジアへの輸出量が増大する。豪州は生産拡大の余地を大きく有すると考えられることから，世界の需要が高まるにつれ，ウラン生産国としての同国の重要性は高まるものと考えられる。ただし，2020年においてはその規模はいまださほど大きくはない。

ウラン濃縮役務需要についても，アジアを中心として増大し，それに応じて北米・ロシア・欧州からの輸入が拡大する。特に，現状と比べて，新規濃縮設備建設計画が多数存在する北米と，設備余力を多量に有するロシアからの輸入拡大が著しい。しかし上述のように，このケースであっても，現在計画されている以上の濃縮設備は必要とされず，むしろ濃縮設備拡張計画が遅延する可能性が高いと考

Table 14　Uranium trade (High demand scenario: 2020)

Unit: tU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	4,082									4,082
Canada	6,450	1,687		4,670				1,850		14,657
L. America	293		1,415					291		2,000
Europe				367						367
FSU	3,769			7,886	9,021	0	294	11,017		31,988
Middle East				667		1,007		6		1,680
Africa	4,984			6,480		0		12,454		23,918
Asia								2,380		2,380
Oceania	1,362			3,755		0		8,212		13,329
World	20,941	1,687	1,415	23,824	9,021	1,007	294	36,210	0	94,400

Table 15　Enrichment trade (High demand scenario: 2020)

Unit: tSWU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	8,276			468				8,205		16,948
Canada										0
L. America			168							168
Europe			629	10,818		327		6,433		18,207
FSU	5,426		129	4,302	5,902	332	192	6,537		22,821
Middle East										0
Africa										0
Asia								2,517		2,517
Oceania										0
World	13,701	0	926	15,588	5,902	659	192	23,692	0	60,662

えられる。

（２）2035年

高需要シナリオの2035年の天然ウランの需要量は価格ケースⅠおよびⅡ（テイル濃度0.11％および0.27％）でそれぞれ106,525 tUおよび138,710 tU，ウラン濃縮役務量は138,521 tSWUおよび90,117 tSWUである。

この場合，価格ケースⅡの場合の天然ウラン需要量は，生産ケースBの112,512 tUを超える。価格ケースⅠの場合でも，天然ウラン需要は生産ケースBの水準に近づく。また濃縮役務需要については，価格ケースⅡの場合にあってさえ，濃縮ケースBの供給力を大幅に超えることとなる。すなわち，今後天然ウラン生産能力や濃縮設備の拡大が順調に進捗しない場合には，高需要シナリオにあっては天然ウランの需給がタイトになる可能性が高い，といえる。

しかし一方でこのケースのように，2020年以降も堅調なウラン生産量の伸びが予想される場合には，それに応じて開発投資が進み，2020年よりもさらにウラン生産量が拡大するとみるのが自然であろう。仮に生産ケースCとして2010年から2020年までの1/2のペースでウラン生産量が拡大した場合を想定すると，2035年の生産量は154,788 tUとなり，テイル濃度0.27％の場合の需要量を上回ることになる。したがって，ウラン資源の堅調な開発投資が継続する場合には，需要の高成長かつ高いテイル濃度を想定しても，十分に供給が足りるものと考えられる。

一方でウラン濃縮設備についていえば，価格ケースⅡおよびⅠで2020年から2035年までに必要とされる設備増加量は，それぞれ17,817 tSWUおよび66,221 tSWUに及ぶ。特に価格ケースⅠでの増加量は現在の世界の濃縮設備容量全体を上回る水準であり，このレベルの新規建設がなされるためには，相当に深刻な需給逼迫と濃縮役務価格の上昇が必要となる。実際には上記のとおり，天然ウラン需給自体はさほど急速な資源開発を想定しなくとも足りるものであり，したがってこのケースでもやはりテイル濃度は高い水準に止まり，濃縮設備の建設は最低限のものとなることが予想される。価格ケースⅡでの設備増加量17,817 tSWUは大規模濃縮プラント3〜4箇所程度に相当し，この程度であれば，2020年から2035年までの間の建設を見込むことに特段の違和感はない。ここでは，前節で述べたとおり，ケースCとして，米国に6,000 tSWU/yrの濃縮プラントが1つ建設され，残りの設備増加必要量は旧ソ連および中国において建設されると想定した。試算結果は**Tables 16**および**17**，**Figs. 8**および**9**のとおりである。

Table 16　Uranium trade (High demand scenario: 2035)

Unit: tU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	6,656									6,656
Canada	6,859	1,910		5,314				2,073		16,156
L. America			2,477					282		2,759
Europe				344						344
FSU	4,438			9,786	12,501	767	898	15,410		43,799
Middle East						2,453				2,453
Africa	4,533			6,419		999		26,160		38,110
Asia								3,682		3,682
Oceania	1,247			4,444		929		18,131		24,751
World	23,733	1,910	2,477	26,306	12,501	5,148	898	65,738	0	138,710

Table 17　Enrichment trade (High demand scenario: 2035)

Unit: tSWU

To: From:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	9,271			485				16,444		26,200
Canada										0
L. America			200							200
Europe			1,077	12,130		1,679		6,814		21,700
FSU	6,363		355	4,713	8,235	1,713	591	13,502		35,472
Middle East										0
Africa										0
Asia								6,545		6,545
Oceania										0
World	15,634	0	1,632	17,329	8,235	3,392	591	43,305	0	90,117

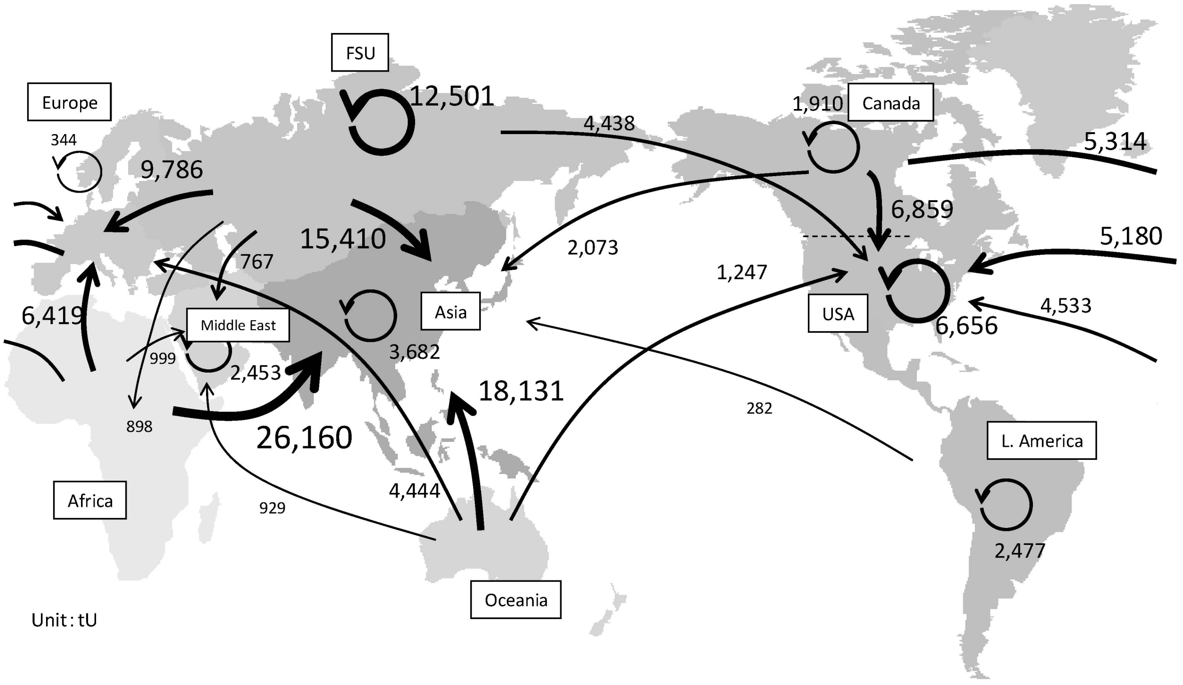


Fig. 8　Uranium trade (High demand scenario: 2035)

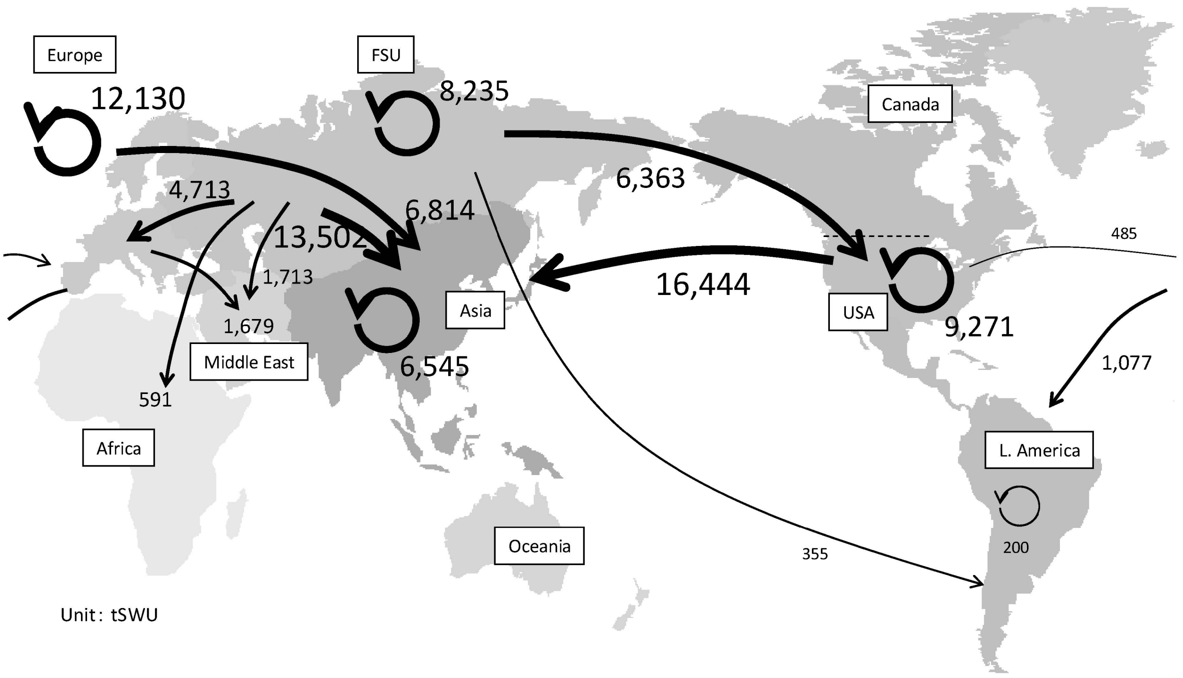


Fig. 9　Enrichment trade (High demand scenario: 2035)

天然ウラン需給については，アジアにおける需要増加が著しく，2020年からの需要増加の67％は同地域におけるものとなる。この需要増加は旧ソ連・アフリカおよび豪州からの輸入によって賄われることとなるが，旧ソ連地域では域内のウラン需要も高まるため，対外輸出量の増加は限定的である。それに対して，アフリカ・豪州からの貿易量が大きく拡大することとなる。

一方で，中国で新たに想定した大規模な濃縮設備にも関わらず，アジアのウラン濃縮役務需要は大幅に不足し，ロシアおよび米国からの供給を受けることとなる。

2035年の高需要シナリオについて，仮に貿易フローが地域間輸送コストに従って最適化されると想定した参考ケースの試算結果は，**Tables 18** および **19** のとおりとなる。ただし，Table 18 は天然ウラン生産からウラン濃縮設備までのフローであり，ウラン生産から燃料需要地までのフローを示した Table 16 等とは比較の水準が異なるが，あくまでも参考のため記した。Table 19 については，上記 Table 17 の試算結果とおおむね似た傾向をみて

Table 18　Uranium transport to enrichment facilities（High demand scenario: 2035, optimized with freight）

Unit: tU

From: \ To:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	6,656									6,656
Canada	11,655			4,501						16,156
L. America	2,450		308							2,759
Europe				344						344
FSU	4,043			1,536	38,220					43,799
Middle East				2,453						2,453
Africa	13,914			7,816	16,380					38,110
Asia								3,682		3,682
Oceania	1,609			16,751				6,391		24,751
World	40,328	0	308	33,401	54,599	0	0	10,074	0	138,710

Table 19　Enrichment trade（High demand scenario: 2035, optimized with freight）

Unit: tSWU

From: \ To:	USA	Canada	L. America	Europe	FSU	Middle East	Africa	Asia	Oceania	World
USA	13,100			17				13,083		26,200
Canada										0
L. America			200							200
Europe			0	12,927		0		8,773		21,700
FSU	2,534		1,432	4,384	8,235	3,392	591	14,904		35,472
Middle East										0
Africa										0
Asia								6,545		6,545
Oceania										0
World	15,634	0	1,632	17,329	8,235	3,392	591	43,305	0	90,117

取ることができるが，このケースでは上述のとおり米国の濃縮設備稼働量のうち50％が米国内の需要に宛てられると想定しており，仮にその制約をなくすと，ロシアから喜望峰周りでアジアまで運ぶ距離よりもロシアから米国までおよび米国からアジアまでの距離の和の方が短いため，米国で濃縮されたウランは全量がアジアに運ばれ，米国からはロシアから供給される，という結果となる。実際には米国とロシアとの間の燃料供給は微妙な政治的状況を踏まえて決められており，その状況が世界の燃料需給に大きな影響を与えることが伺える。

3. アジア地域への天然ウラン・ウラン濃縮役務供給

上記のように今後の原子力発電設備増強の核となるのはアジア地域であり，天然ウランおよびウラン濃縮役務の需要全体に占める同地域のシェアは，現在の30％程度から，2035年にはケースによって40～50％程度まで上昇すると見通される。このため，アジア地域の需要拡大をいかに賄うかが今後のウラン需給の中心的な課題となる。

上記の各ケースについて，アジアへの天然ウランおよびウラン濃縮役務の供給構成を示したものが **Figs. 10** および **11** である。現在，アジア地域へはかなりの量の天然ウランが旧ソ連地域（ロシア，カザフスタン等を含む）から供給されているものと推計されるが，今後，同地域内で見込まれる原子力発電設備の伸びなどから，需要増大を賄うのはこの地域でないことがわかる。その代りに，短中期的にアフリカからの供給が拡大するものと見通される。上述のように，原子力発電設備の増加が抑制された低需要シナリオでは天然ウランの需給は大きく緩和され，資源開発も停

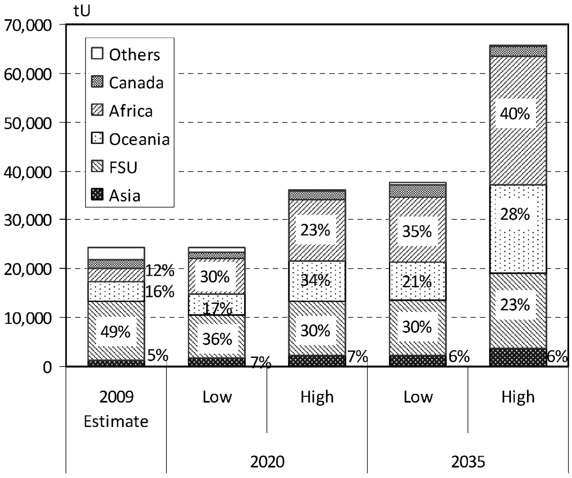


Fig. 10　Uranium supply to Asia

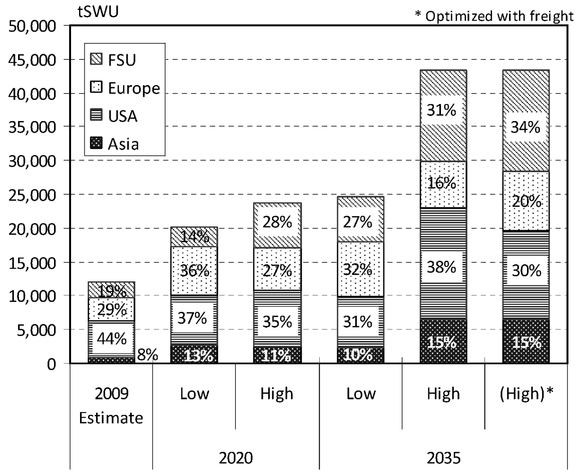


Fig. 11　Enrichment supply to Asia

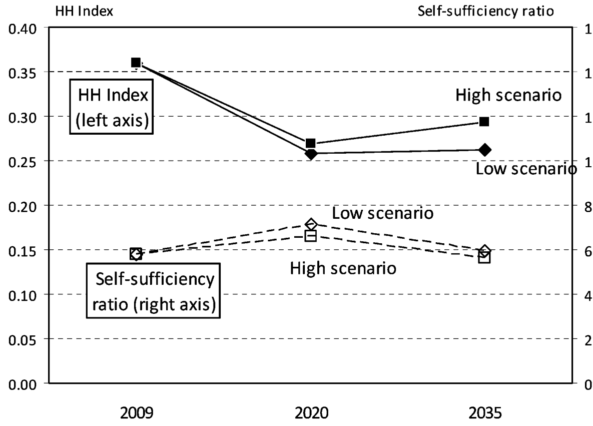


Fig. 12　HH index and self-sufficiency ratio (Uranium)

滞するものと考えられるが，このケースではアフリカ以外の地域からの輸入が大きく増加することはない。一方で，原子力発電設備が最大限に拡大する高需要シナリオでは，アフリカとともに豪州からの輸入が需要の急拡大を満たすこととなり，この両地域からの輸入が2035年の需要量の７割近くを占める。アジア域内での生産は需要の６％程度を賄うに過ぎず，資源の対外依存状況は長期に渡って継続するものと考えられる。

ウラン濃縮役務については，大規模な新設計画の存在する米国からの輸入が中期的に増加する。しかし長期的な需要の増大に伴って供給量が増加するのは旧ソ連地域であり，特に需要が拡大するケースで同地域の重要性が高まる。逆に欧州からアジアへの供給比率は低下し，またアジア域内での供給比率が大きく上昇することもない。天然ウラン資源と同様，ウラン濃縮役務についても，今後長期に亘り域外からの輸入に頼る状況が継続するものと見通される。なお Fig. 11 には貿易フローが地域間輸送コストに従って最適化されるとした参考ケースの結果も示しており，2035年の高需要ケースとおおむね似た結果となっていることがわかる。

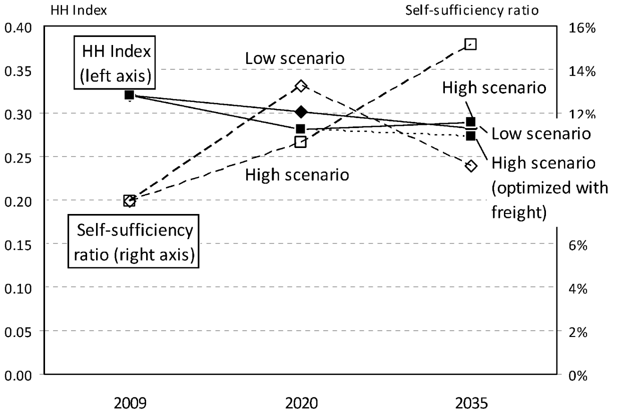


Fig. 13　HH index and self-sufficiency ratio (Enrichment)

Figures. 12 および **13** はそれぞれのケースについて，アジアにおける天然ウラン・ウラン濃縮役務供給の自給率と HH（Herfindahl–Hirshman）指数との推移を示したものである。上述のとおり，天然ウランの自給率は2035年まで６％程度の極めて低い水準に止まるものと見通される。またウラン濃縮役務については，最も高い場合（2035年の高需要シナリオ）で新規濃縮設備の運開に伴い15％程度まで上昇するが，上述のとおりこれ以上の設備建設により自給率を向上させることは，ウラン濃縮役務需給および価格の上から，難しいものと考えられる。

HH 指数は天然ウラン・ウラン濃縮役務のアジアへの供給元の多様性を以下の式により示すものであり，数値が小さい方が供給元が多様化され，エネルギー・セキュリティ上好ましいものとされる。

$$HH=\sum_i \left(\frac{a_i}{X}\right)^2 \qquad (2)$$

ここで a_i はアジアに対する地域 i からの供給量，X はアジアに対する総供給量である。この HH 指数について，2009年現在の推定実績は天然ウランについて0.36，ウラン濃縮役務について0.32となっており，特に天然ウランは文献31）から推計されるアジア地域の石油供給に関する値（0.37）よりも若干低い程度となっている。この原因は，2009年の実績値では旧ソ連地域からの供給比率が高いことによる。しかし Figs. 12 および 13 からわかるとおり，天然ウランに関してはアフリカ，豪州等からの供給が増加することにより，またウラン濃縮役務に関してはロシア・米国・欧州の主要三地域からバランスよく供給を受けることにより，ともに0.3を下回る程度まで HH 指数が低減する見通しとなる。なお参考ケースについては，Fig. 13 で自給率については通常の高需要シナリオと同じ値であり，HH 指数についてもほぼ同等の値となっている。

IV. 結　　論

本研究では，原子力発電量の増加と天然ウラン生産能力・ウラン濃縮役務容量の拡大を組み合わせることにより，長期に渡る天然ウランおよびウラン濃縮役務の貿易フローを推計した。今後アジア地域を中心として原子力発電

設備は拡大を続けるものの，現在計画されている天然ウラン資源開発や濃縮設備の増強などから，2020年までの間は天然ウランおよびウラン濃縮役務の需給は緩和するものと見通される。このため中期的に，資源開発・濃縮設備増強等が大幅に遅延する可能性も高い。原子力発電設備の伸びが緩やかなケースでは，この傾向は2035年まで継続し，ウラン生産量は2020年に比べて減退する可能性さえ考えられる。一方で，化石燃料も含めたエネルギーの安定供給や地球温暖化対策等の観点から世界各国が最大限に原子力発電を推進したケースでは，既存のプロジェクト以上に計画が進展することが求められるが，そのペースは現在計画中のものと比べて比較的緩やかであっても需要を賄うに足りるものと考えられる。これらのことから，2020年頃までは現在進行中の開発計画を進め，その後需要の伸びを見極めつつ新規のプロジェクトを適切に開始すれば，今後20～30年間の間は天然ウランおよびウラン濃縮役務の需給が極端に逼迫する恐れは少ない，といえるだろう。また，天然ウランおよびウラン濃縮役務の需給の関係からは，今後長期に亘りテイル濃度は高い水準を保つこと，すなわち相対的に天然ウラン価格に比べてウラン濃縮役務価格が高い水準で推移することが見通される。

今後需要拡大の中心となるのはアジア地域である。同地域においては天然ウラン・ウラン濃縮役務ともに対外依存度は長期的に高いままで推移する。天然ウランについては，今後需要拡大に対応するのはアフリカおよび豪州からの輸入である。またウラン濃縮役務については，中期的には米国，さらにはロシアからの輸入が拡大するものと見通される。原子力発電は燃料としての長い備蓄性のほか，核燃料サイクルの国産化や，使用済み燃料の再利用等も視野に入れて「準国産」エネルギーとみなされることが多いが，本試算から明らかなように，少なくとも天然ウラン生産およびウラン濃縮に関してアジア地域内での自給率を大幅に上昇させることは，中長期的にも困難であると考えられる。一方で世界的な開発計画の進展により，将来的に供給地域の分散化（HH指数）については石油に比べて大きく改善されるものと見通される。このため，原子力発電の進展はアジア地域のエネルギー安全保障にとって一定の貢献をなし得る，との評価はできるであろう。

本研究の対象期間である2035年を超えて原子力発電設備の拡大が進む場合には，新規のウラン資源・ウラン濃縮設備の開発動向次第では，その需給が次第に逼迫状況に向う可能性もある。ただしこの時間スケールを考える場合には，高速増殖炉やトリウム資源の利用，さらには海水からのウラン抽出，核融合など，天然ウラン需要を抑制する様々な技術の導入を考える必要があるだろう。逆にいえば，本試算から明らかなように，2035年までのウラン需給を考える限りにおいては，これらの革新的な新技術は必ずしも不可欠ではない，といってよい。より長期の視野の中で，これらの技術の位置付けをどのように捉えるかは，今後の重要な研究課題であるといえる。

本研究の一部は環境省の環境研究総合推進費（S-6-1：アジア低炭素社会に向けた中長期的政策オプションの立案・予測・評価手法の開発とその普及に関する総合的研究，「アジアを対象とした低炭素社会実現のためのシナリオ開発」）の支援により実施された。環境省に対し，甚深なる謝意を表するものである。

―参考文献―

1) Ministry of Economy, Trade and Industry, *The Strategic Energy Plan of Japan* (2010).

2) International Energy Agency, *World Energy Outlook 2011*, IEA Publications, ISBN 9789264124134 (2011).

3) International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2010*, IEA Publications, ISBN 9789264085978 (2011).

4) International Atomic Energy Agency, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*, IAEA Vienna, ISBN 9789201194107 (2011).

5) OECD, Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy Outlook 2008*, OECD Publishing, ISBN 9789264054103 (2008).

6) U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2011*, DOE/EIA-0484 (2011).

7) World Nuclear Association, *The WNA Nuclear Century Outlook: Averting the Danger of Catastrophic Climate Change: Is the Nuclear Renaissance Essential?*, WNA (2011).

8) OECD, International Energy Agency, *Uranium 2009 Resources, Production and Demand*, OECD Publishing, ISBN 9789264047907 (2009).

9) World Nuclear Association, *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2011–2030*, WNA (2011).

10) R. Komiyama, T. Kakinoki, “Long-term outlook for nuclear power generation and uranium demand and supply situations up to 2030 and 2100,” *Energy Keizai*, **33**[3], 1–24 (2007), [in Japanese].

11) T. Murakami, “Nuclear fuel demand and supply outlook up to 2030,” *Energy Keizai*, **33**[5], 22–34 (2007), [in Japanese]

12) Y. Matsuo, M. Aoshima, M. Kako *et al.*, “Asia/world energy outlook 2011 —Growing uncertainty over international energy trends and the future of Asia—,” *IEEJ Energy J.*, **7**[1], 17–55 (2012).

13) Y. Matsuo, “U. S. nuclear energy policy and Japan’s nuclear industry expansion trends,” *IEEJ Energy J.*, **6**[2], 27–42 (2011).

14) U. S. Energy Information Administration, *Annu. Energy Outlook 2011*, DOE/EIA-0383 (2011).

15) National Energy Board, *Canada’s Energy Future: Energy Supply and Demand Projections to 2035*, ISBN 9781100194646 (2011).

16) Japan Atomic Industrial Forum, *World Nuclear Power Plants 2011*, JAIF (2011).

17) Denki Shimbun, *Nuclear Pocket Book*, The Japan Electric Association, ISBN 9784905217053C0550 (2011), [in Japanese]

18) World Nuclear Association Website, http://www.world-nuclear.org/

19) Japan Atomic Energy Agency, *Oubei ni Okeru Kakunenryou*

Saikuru ni Kansuru Chousa (*A Report on Nuclear Fuel Cycle in Europe and North America FY 2007*), (2008), [in Japanese].

20) Areva, *2011 Reference Document* (2011).
21) URENCO, *Annual Report and Accounts 2011* (2011).
22) Ux Consulting Website, http://www.uxc.com/
23) H. Hirai, Y. Matsuo, Y. Nagatomi, "Supply and demand analysis on petroleum products and crude oil for Asia and the world," *IEEJ Energy J.*, **3**[3], 29–60 (2008).
24) Y. Kobayashi, "Natural gas situation and LNG supply/demand trends in Asia-Pacific and Atlantic markets," *IEEJ Energy J.*, **5**[1], 65–96 (2010).
25) P. Diehl, *Re-enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia*, WISE Uranium Project, http://www.wise-uranium.org, (2004).
26) Poten and Partners, *Estimated Voyage Costs —Round Trip Economics* (2011).
27) U. S. Committee on the Internationalization of the Civilian Nuclear Fuel Cycle, Committee on International Security and Arms Control, National Academy of Sciences and National Research Council, *Internationalization of the Nuclear Fuel Cycle: Goals, Strategiesand Challenges*, The National Academies Press, ISBN 9780309126601 (2009).
28) NAC International, *Selected Aspects of the Fuel Cycle Front End* (2011).
29) World Scale Association, *New Worldwide Tanker Nominal Freight Scale* (2010).
30) PESCO Co., Ltd, *Kakunenryou Saikuru Shisetsu, Gijutsu tou ni Kakaru Doukou Chousa* (*A Report on Nuclear Fuel Cycle Facilities and Technologies*) (2009), [in Japanese].
31) BP, *Statistical Review of World Energy June 2012* (2012).